



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN ARQUITECTURA  
CAMPO DE TECNOLOGÍAS**

**Desarrollo de un Sistema de Impresión Tridimensional para la Arquitectura**

**TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:**

**MAESTRO EN ARQUITECTURA**

**PRESENTA:**

Arq. Esteban Pérez de León

**TUTORA PRINCIPAL**

Dra. Genevieve Lucet Lagriffoul  
Instituto de Investigaciones Estéticas - UNAM

**MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR**

Mtro. Ernesto Ocampo Ruiz  
Facultad de Arquitectura – UNAM

Mtra. Berenice Rodríguez Pedroza  
Universidad de las Américas – Puebla

Ciudad Universitaria, Ciudad de México, agosto 2023



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## **INTEGRANTES DEL SÍNODO**

Mtro. Leonardo Bernardo Zeevaert Alcántara  
Facultad de Arquitectura - UNAM

Mtro. Edouard Cabay  
Universidad Politécnica de Barcelona

El apoyo del CONAHCYT hizo este trabajo posible. Muchas gracias.

Muchas gracias, Esperanza, por ese par de manos extra. Nos vinieron de lujo.  
Muchas gracias, Miguel, por tu apoyo incondicional.  
Muchas gracias, Rosario, por tu tolerancia.  
Muchas gracias, Mishelle, por confiar tanto en mí.  
Muchas gracias, Alberto, por hacerme lo que soy.

Dedico este trabajo a todas las ovejas negras.

## TABLA DE CONTENIDO

1.	Preámbulo.....	5
2.	Introducción.....	6
3.	Justificación.....	15
4.	Hipótesis.....	16
5.	Capítulo 1: Marco teórico.....	18
6.	Capítulo 2: Desarrollo de la propuesta.....	53
7.	Capítulo 3: Experimentación.....	84
8.	Capítulo 4: Análisis de resultados.....	92
9.	Conclusiones.....	101
10.	Apéndice.....	105
11.	Bibliografía.....	110
12.	Índice de Imágenes.....	114
13.	Índice de Tablas.....	116
14.	Índice de Gráficas.....	117

## 1.- Preámbulo

El sector de la construcción en México necesita modernizarse. Mientras existe un incremento en la demanda de medio construido, la mano de obra calificada escasea y el alza en los costos de producción hacen que el acceso a una vivienda digna no sea más que un sueño para la mayoría de la población de nuestro país.

*“Todo esto sucede mientras seguimos construyendo como lo hacíamos hace más de 100 años”.*

¿Qué se necesita para impulsar la verdadera edificación sustentable en México?, ¿hablamos de la adopción de nuevos materiales? ¿o de la implementación de nuevas técnicas?

Desde mi punto de vista, la respuesta se encuentra en ambos. Esta afirmación me llevó a integrar el raciocinio arquitectónico al desarrollo de nuevos procesos constructivos automatizados, que a través de una investigación meramente transdisciplinaria busca guiar de manera concisa a cualquier individuo interesado en aprender más acerca de la automatización en la construcción mediante fabricación aditiva, o como me gusta llamarle: *“Arquitectura Impresa en 3D”*.

Con 7 años de experiencia en el campo de modelado e impresión tridimensional, y con el objetivo de explorar y explotar los beneficios de la Impresión Tridimensional en el campo de la Arquitectura, este contemporáneo busca diseñar y construir una herramienta propia, un: *“Sistema de Impresión Tridimensional para la Arquitectura”*.

El desarrollo de dicha herramienta le permitirá al Arquitecto sumar conocimientos como variables a su proceso de diseño, dado que el aspecto físico y funcional de una obra arquitectónica impresa en 3D se encuentra estrechamente relacionado con los aspectos técnicos de la herramienta y los materiales utilizados para su fabricación.

Comencemos.

## 2.- Introducción.

*“La mancha urbana crece, no desaparece. La mancha urbana no es densa, es extensa. La mancha urbana actual, es disfuncional, es caos y es crisis económica, social y medio ambiental... ¿Seguiremos destruyendo para seguir construyendo?, ¿Seguir avanzando para seguir contaminando?”*

Quiero aclarar que la razón por la cual redacté este capítulo fue para otorgarle al lector las herramientas necesarias para juzgar la pertinencia de esta investigación. Mi intención es hacerlo consciente de una serie de fenómenos sociales cuya evolución ha derivado en problemáticas actuales. Por favor tenga paciencia, al final de este capítulo logrará entenderlo todo.

Es un derecho de los mexicanos entrar y salir del país, viajar de un lugar a otro dentro del territorio nacional o mudar su residencia sin que se requiera algún permiso o documento legal para hacerlo, con las limitaciones establecidas en la ley<sup>1</sup>. La posibilidad que tienen las personas de iniciar una nueva vida en otro sitio, con el objetivo de mejorar sus oportunidades laborales, educativas y de calidad de vida, ha motivado las migraciones a lo largo de la historia de la humanidad.

Actualmente, y desde hace ya algunos años, factores como la inseguridad, la política, el aumento de la violencia y la contaminación ambiental, se han sumado a la diversificación de los motivos de la migración. Los cambios de residencia de la población han estado presentes en la historia de nuestro país como motor del desarrollo económico y social, convirtiendo a la migración en una importante fuerza modeladora de su estructura<sup>2</sup>.

Se ha teorizado mucho acerca de las causas de los fenómenos migratorios. En 1885, el profesor E. G. Ravenstein, el primer investigador que se dio a la tarea de descubrir "Las

---

<sup>1</sup> “¿Cuáles son los Derechos Humanos? | Comisión Nacional de los Derechos Humanos - México”, consultado el 11 de febrero de 2021, <https://www.cndh.org.mx/derechos-humanos/cuales-son-los-derechos-humanos>.

<sup>2</sup> Olga Sánchez Cordero y Graciela Márquez Colín, “Consejo Nacional de Población”, s/f, 68.

leyes de la migración", ofrecía una primera explicación del tema, y sostenía que: "Queda fuera de toda duda el hecho de que la demanda de fuerza de trabajo en nuestros centros de industria y comercio sea la causa primordial de estas corrientes de migración... Por ende, si hablamos de modo un tanto presuntuoso sobre "leyes de migración", podemos solamente referirnos a la manera en que la carencia de manos trabajadoras en un sector del país se satisface con las de otros sectores en los que la población es redundante"<sup>3</sup> .

Tomando en cuenta que las principales actividades económicas pasaron a las ciudades, y las relaciones que se establecieron entre éstas y el campo se hicieron muy desiguales, los agricultores empezaron a pensar en la posibilidad de emigrar a regiones donde existiese una demanda de mano de obra, es decir, en donde hubiese oportunidad.

Una segunda explicación, habla de la "atracción de las luces de la ciudad", esta observación fue hecha en 1894, y se le atribuye a un Comisionado Adjunto del Trabajo en Reino Unido<sup>4</sup>, el cual sostenía que los trabajadores agrícolas migran a las ciudades; "...no por los mejores salarios que se ofrecen, sino por el menor número de horas de trabajo que se exigen y, sobre todo, por sentirse integrados al flujo central de la vida social". Con esto se refería a la expansión de actividades de recreación en las ciudades inglesas de la época: espectáculos culturales, bailes, eventos deportivos y oportunidades educativas. Se podría decir que desde ese entonces, se calificaba como "superior" al estilo de vida que se podía obtener habitando dentro de las ciudades.

Actualmente existen una serie de teorías que tratan de explicar el fenómeno de la migración, por ejemplo, se suele decir que los campesinos se desplazan a las ciudades dadas las condiciones de pobreza extrema a las que se enfrentan en el campo.

---

<sup>3</sup> E. G. Ravenstein, "The Laws of Migration", *Journal of the Statistical Society of London* 48, num. 2 (junio de 1885): 167, <https://doi.org/10.2307/2979181>.

<sup>4</sup> Lourdes Arizpe, "Migración, etnicismo y cambio económico (un estudio sobre migrantes campesinos a la ciudad de México)", s/f, 271.

Pero lo cierto es que la gente que más tiende a migrar es aquella que no sufre condiciones extremas de pobreza<sup>5</sup>. La razón que más se utiliza para explicar este fenómeno es que la gente migra en busca de empleo. Pero hay ciudades, sobre todo en países en desarrollo, que no ofrecen ninguna posibilidad de empleo y, sin embargo, los migrantes siguen llegando a formar parte de sus asentamientos urbanos irregulares. También se dice que los migrantes se mudan a las ciudades con la expectativa de elevar sus niveles de calidad de vida. Sin embargo, a las ciudades también llegan migrantes que no buscan progresar en lo absoluto, sino solamente sobrevivir.

La migración rural-urbana en América Latina se ha dado como resultado del deterioro de las condiciones económicas en el campo derivadas de sus estructuras productivas<sup>6</sup>. El alto crecimiento de la población deriva en el aumento del número de trabajadores que tienen que encontrar una fuente de sustento.

*“La única esperanza de supervivencia o de acomodo económico la ofrecen las ciudades”.*

Sea cual sea el origen del fenómeno de la migración y el aumento poblacional de las ciudades, estos, junto con un nulo desarrollo ordenado y sustentable de la infraestructura política y constructiva que les contiene, derivan en el crecimiento desmedido de la mancha urbana: Las ciudades representan los espacios de mayor contradicción del desarrollo urbano<sup>7</sup>, con un costo ambiental alto, resultado de una mezcla inadecuada de usos de suelo y bajo la constante premisa de construcción y expansión, las zonas metropolitanas avanzan apropiándose de las pequeñas localidades y espacios de su periferia, lo que trae como resultado una transformación de su fisonomía, además de establecer relaciones desiguales de desarrollo económico y social; tal es el caso de nuestro hábitat: la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM).

---

<sup>5</sup> Arizpe.

<sup>6</sup> Arizpe.

<sup>7</sup> Clemencia Santos Cerquera, Irma Escamilla Herrera, y Lizbeth Guarneros Avilés, “Expansión urbana al norte de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México: ¿un triángulo de deterioro ambiental sin posibilidad de desarrollo sustentable?”, s/f, 27.

La ZMVM, conformada por la Ciudad de México y por 60 municipios conurbados, uno de ellos en el estado de Hidalgo y los restantes en el Estado de México, se encuentra en constante expansión. Su superficie crece a un ritmo 3 veces superior al de su población<sup>8</sup>, según los cálculos realizados por la ONU-Hábitat, a través del Índice de las Ciudades Prosperas (CPI)<sup>9</sup>.

La población urbana de la ZMVM pasó de registrar una población total de 14,278,922 habitantes, en el año 1980, a un total de 21,267,873 habitantes para el año 2017 según proyecciones del Consejo Nacional de Población (CONAPO)<sup>10</sup>, que implica una tasa de crecimiento poblacional del 1.1%. En paralelo, la tasa de crecimiento de la superficie urbana ha crecido a un ritmo tres veces superior (3.3%), pasando de una superficie de 61,820.37 hectáreas en 1980 a 235,267.873 hectáreas que la ZMVM registra en 2017<sup>11</sup>. Las proyecciones de la CONAPO para el año 2035 estiman que en el Estado de México habitarán aproximadamente 19,369,581 personas, mientras que en la Ciudad de México habitarán un total de 8,571,330 personas.

La población de la ZMVM seguirá en aumento, de eso no cabe duda, a pesar de que en años venideros la cantidad de habitantes dentro de la ciudad de México se reducirá en aproximadamente un 5% para el año 2035, la población del Estado de México aumentará en aproximadamente un 11% para el mismo año<sup>12</sup>. De mantenerse el mismo patrón de crecimiento expansivo, este traerá consigo una serie de anomalías urbanas, como la

---

<sup>8</sup> "ONU-Hábitat - Superficie de CDMX crece a ritmo tres veces superior al de su población", consultado el 9 de febrero de 2021, <https://onuhabitat.org.mx/index.php/superficie-de-cdmx-crece-a-ritmo-tres-veces-superior-al-de-su-poblacion>.

<sup>9</sup> El CPI es una metodología diseñada por ONU-Hábitat para entender, analizar, planificar, tomar acción y observar los efectos de las políticas públicas en el bienestar ciudadano. Mediante indicadores obtenidos a partir de información confiable, el CPI es una radiografía de la complejidad urbana, traduce el bienestar en una métrica medible, y mide la eficiencia de la ciudad y el efecto de las políticas públicas en el tiempo.

<sup>10</sup> "Indicadores Demográficos de México de 1970 a 2050 | Gobierno | CONAPO | datos.gob.mx", consultado el 9 de febrero de 2021, [http://www.conapo.gob.mx/work/models/CONAPO/Mapa\\_Ind\\_Dem18/index.html](http://www.conapo.gob.mx/work/models/CONAPO/Mapa_Ind_Dem18/index.html).

<sup>11</sup> Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), "Marco Geoestadístico" (Instituto Nacional de Estadística y Geografía. INEGI), consultado el 9 de febrero de 2021, <https://www.inegi.org.mx/temas/mg/#Descargas>.

<sup>12</sup> "Indicadores Demográficos de México de 1970 a 2050 | Gobierno | CONAPO | datos.gob.mx".

congestión vial, la degradación ambiental, la disminución de la productividad laboral y los altos costos relacionados con la movilidad.

La relación entre la tasa de consumo de suelo y la tasa de crecimiento de la población urbana calculada con base a los indicadores de CPI indica que la aglomeración urbana de la Ciudad de México sigue un patrón de crecimiento expansivo y de baja densidad. Este tipo de crecimiento implica un consumo ineficiente del suelo que genera estructuras urbanas discontinuas y con alto grado de fragmentación, lo que además de ser financieramente insostenible, es simplemente ineficaz e inequitativo.

En un principio, una variante residencial era que los migrantes habitaran viejas casonas a punto de derrumbarse en los centros de las ciudades<sup>13</sup>. Al principio, las vecindades del centro de la ciudad se convirtieron en el lugar por excelencia para los recién inmigrados<sup>14</sup>. Sin embargo, la magnitud del proceso de inmigración rebasó la capacidad habitacional de esa oferta de alquiler de cuartos, mientras que el mercado formal de suelo y vivienda excluyó a esa población por su carencia de empleo formal y sus bajos ingresos<sup>15</sup>. Esto dio origen a la formación de asentamientos humanos ilegales e irregulares, pero, sobre todo, marginales. Se trata de viviendas y barrios autoconstruidos por la población de bajos ingresos en suelo de conservación o de propiedad federal y con diversas formas informales de acceso a estos como por ejemplo a través de la invasión o paracaidismo, como se le conoce popularmente en México.

La vivienda y el crecimiento poblacional se han dado en gran medida fuera de la Ciudad de México, a sitios periféricos donde la regulación de uso del suelo y su aplicación tienden a ser menos restrictivos y la vivienda suele ser más accesible en términos económicos.

---

<sup>13</sup> Arizpe, "Migración, etnicismo y cambio económico (un estudio sobre migrantes campesinos a la ciudad de México)".

<sup>14</sup> Víctor Delgadillo, V., "Ciudades iletradas: orden urbano y asentamientos populares irregulares en la ciudad de México", *Territorios* 18, núm. 35 (el 15 de agosto de 2016): 81–99, <https://doi.org/10.12804/territ35.2016.04>.

<sup>15</sup> John C. Turner, "Housing Priorities, Settlement Patterns, and Urban Development in Modernizing Countries", *Journal of the American Institute of Planners* 34, núm. 6 (noviembre de 1968): 354–63, <https://doi.org/10.1080/01944366808977562>.

Este proceso ha contribuido a la expansión urbana. Sin embargo, el empleo ha seguido concentrándose en el núcleo metropolitano: en las cuatro alcaldías centrales de la Ciudad de México se ofrece un tercio de los empleos y el 43% de los empleos del sector servicios<sup>16</sup>. Como resultado, en la ZMVM, más del 40% de los habitantes cruzan al menos una frontera municipal para llegar a su trabajo. La creciente distancia entre los centros residenciales y los centros de empleo ha provocado un aumento en las distancias y tiempos de traslado. En concreto, ONU-Hábitat cifra en cinco horas y media el tiempo promedio que emplea una persona en cruzar la aglomeración urbana de la Ciudad de México utilizando transporte público; unas tres horas si lo hace en un vehículo particular<sup>17</sup>.

La ZMVM debe desenvolverse de una manera más ordenada, estandarizando la óptima ocupación de territorio promoviendo una lógica de cercanía entre los distintos núcleos metropolitanos como lo son la vivienda, la educación o las fuentes de empleo.

En el año 2012, se propuso el Modelo Policéntrico de Ocupación Territorial como parte del Programa de Ordenación de la Zona Metropolitana del Valle de México<sup>18</sup> creado por el trabajo conjunto del gobierno de la Ciudad de México, el gobierno del Estado de México, el gobierno del Estado de Hidalgo y la Universidad Nacional Autónoma de México. En este plan de ordenamiento, se plantea la construcción y consolidación de una estructura policéntrica complementaria al gran centro urbano tradicional de la Ciudad de México.

La estructura policéntrica propuesta contempla el impulso de 12 centralidades en 2 categorías: las primarias (7) y las complementarias (5), que fueron escogidas dada la magnitud de las poblaciones que aglutinan, sus actividades económicas, la

---

<sup>16</sup> OECD, OECD Territorial Reviews: Valle de México, México, OECD Territorial Reviews (OECD, 2015), <https://doi.org/10.1787/9789264245174-en>.

<sup>17</sup> "ONU-Hábitat - Superficie de CDMX crece a ritmo tres veces superior al de su población".

<sup>18</sup> "Programa de Ordenación de la Zona Metropolitana del Valle de México.pdf", s/f.

especialización y la jerarquía de las funciones organizadoras (económicas y de gobierno), su conectividad, el creciente rol de destino de viajes, así como de la oferta concentrada de equipamientos y servicios públicos<sup>19</sup>. Las centralidades o nodos metropolitanos primarios propuestos, fueron: Naucalpan-Azcapotzalco, Santa Fe-Huixquilucan, Tlalpan, Ixtapaluca, Nezahualcóyotl-Iztapalapa, Ecatepec y Cuautitlán Izcalli. Las centralidades complementarias fueron: Texcoco, Zumpango, Tecámac, Pachuca de Soto y Tula de Allende. El impulso a estas centralidades o nodos consiste en concentrar en ellos, la oferta de nuevos equipamientos de educación, salud, cultura, recreación y administración pública. El carácter nodal o central se consolida cuando en estos núcleos se promueve también la ubicación de establecimientos y programas de apoyo al desarrollo económico de la región metropolitana<sup>20</sup>.

Llevar a cabo una subdivisión estratégica de la ZMVM, podría fomentar la creación de vivienda de alquiler nueva y de bajo costo, que, en conjunto con políticas que faciliten el acceso a esta, podrían simplificar la movilidad de sus habitantes. Desarrollar este tipo de vivienda en barrios centrales para las familias de bajos ingresos puede ser una estrategia más adecuada que la de algunos programas actuales que se orientan a concentrar la vivienda de alquiler en zonas periféricas de la ciudad.

Se estima que para el año 2050, en México se necesitarán 18.6 millones de viviendas nuevas, demandándose en promedio 531,500 viviendas cada año<sup>21</sup>.

---

<sup>19</sup> "Programa de Ordenación de la Zona Metropolitana del Valle de México.pdf".

<sup>20</sup> "Programa de Ordenación de la Zona Metropolitana del Valle de México.pdf".

<sup>21</sup> Sociedad Hipotecaria Federal, "Estado Actual de la Vivienda en México (EAVM) 2017", gob.mx, consultado el 12 de febrero de 2021, <http://www.gob.mx/shf/documentos/estado-actual-de-la-vivienda-en-mexico-eavm-2017>.

Tomando en cuenta los datos mencionados anteriormente, considero que se hace imperativo planear a consciencia el crecimiento inteligente de las zonas periféricas de nuestra ciudad mientras se desarrollan opciones de vivienda que además de contribuir a la densificación de zonas centrales, respondan directamente a las necesidades de la población mexicana de manera atemporal.

**Es un hecho** que la ZMVM, así como otras megalópolis del mundo, necesitan más y mejor vivienda; accesible no sólo en términos urbanos sino económicos también. **Es un hecho** que con el paso del tiempo esta necesidad crecerá aún más. **Es un hecho** que para desarrollar vivienda es necesario construir, no sólo un edificio sino la infraestructura necesaria que le rodee, estamos hablando también de sistemas de transporte, caminos, puentes. Para satisfacer la creciente demanda de vivienda se hace necesario desarrollar medio construido y adaptar el existente para que provean un escenario adecuado para el desarrollo de la actividad humana. Sin embargo, **es también un hecho** que el medio construido es el responsable de 2/3 partes de todas las emisiones de gases de efecto invernadero a nivel mundial<sup>22</sup>. El desarrollo de cualquier tipo de edificación bajo las premisas tradicionales de la construcción, genera y seguirá generando un impacto ambiental gigantesco.

El Programa Medio Ambiental de las Naciones Unidas<sup>23</sup> informa que la huella ecológica del sector de la construcción se compone de un 40% de uso de energía, 30% de uso de materias primas, 25% de residuos sólidos, 25% de uso de agua y 12% del uso del suelo. Esta tendencia puede parecer en aumento ya que también se declaró que las emisiones globales de gases de efecto invernadero de los edificios continúan aumentando a una tasa anual del 1,5%<sup>24</sup>. Comprender el flujo del uso de la energía utilizada para el desarrollo de

---

<sup>22</sup> "GBES-LEED-Green-Associate-Exam-Prep-Study-Guide-LEED-v4-Edition.pdf", s/f.

<sup>23</sup> U. N. Environment, "Sustainable Buildings", UNEP - UN Environment Programme, el 26 de septiembre de 2017, <http://www.unenvironment.org/explore-topics/resource-efficiency/what-we-do/cities/sustainable-buildings>.

<sup>24</sup> T. Ibn-Mohammed et al., "Operational vs. Embodied Emissions in Buildings— A Review of Current Trends", *Energy and Buildings* 66 (noviembre de 2013): 232–45, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.07.026>.

los materiales de construcción, procesos constructivos y las actividades involucradas en el ciclo de vida de las edificaciones es fundamental para cumplir los objetivos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero a nivel nacional y mundial.

Para minimizar los impactos ambientales negativos que el sector de la construcción tiene en nuestro país, se han llevado a cabo diversas propuestas que van desde el uso de materiales constructivos sustentables, diseño ecológico de los edificios, diseño pasivo, el uso eficiente de recursos, políticas de construcción y demolición, investigación y desarrollo de nuevos materiales y hasta la implementación de métodos de certificación para la edificación sustentable, por mencionar algunos. Si bien estos esfuerzos han rendido sus frutos, la industria de la construcción permanece desactualizada. En la actualidad la industria de la construcción no se encuentra al mismo nivel que el resto de las industrias en cuanto a los requisitos de eficiencia, productividad y sostenibilidad requerida por la sociedad<sup>25</sup>.

*¿Qué pasa si optimizamos el desarrollo del hábitat a través de nuevas tecnologías?...*

En los últimos cien años, apenas han existido modificaciones al modo de construir, esta falta de modernización ha provocado un estancamiento de la praxis actual de la disciplina. Uno de los problemas más grandes de la industria de la construcción es que su máxima productividad, haciendo uso de un sistema tradicional de construcción, es del 30%<sup>26</sup> esto sugiere la necesidad de un cambio claro en los procesos, materiales y mecánicas empleados. Se ha vuelto imperativo propiciar un cambio del paradigma constructivo en México. Es por esto por lo que propongo automatizar la construcción a través de la tecnología de fabricación aditiva, desarrollando Sistemas de Impresión Tridimensional para su uso en la Arquitectura.

---

<sup>25</sup> "Javier Letón Carrasco, Automatización en la Construcción.pdf", s/f.

<sup>26</sup> "Javier Letón Carrasco, Automatización en la Construcción.pdf".

### 3.- Justificación.

Hacer Arquitectura va más allá de diseñar una obra bajo la premisa de estética y plasmarla en papel mediante el uso de un software. Hacer Arquitectura es hacer hábitat y el hábitat humano es tan complejo como los propios pensamientos de un individuo. Tan complejo es el hábitat que no sólo se observa, no sólo se disfruta visualmente, este se vive, se siente y se respira. De igual forma debe vivirse, sentirse y respirarse el crear arquitectura. Si queremos llegar al núcleo del desarrollo de un espacio debemos ser capaces de controlar la materia prima para su creación en cualquiera de sus formas, debemos ser capaces no sólo de malearlo, sino de entenderle.

Pensemos en el metal. No es posible desarrollar arquitectura en metal si le desconocemos como material, si lo vemos solamente como una pieza inerte del rompecabezas de nuestro programa arquitectónico. ¿Suena lógico? ¿Cómo podemos desarrollar un proyecto en metal si desconocemos sus características básicas de fabricación y de qué forma se trabaja este material? Placas, tubos, barras, vigas, perfiles, calibres, cédulas, durezas, aleaciones... ¿qué es una cédula?... ¿Qué diferencia habrá en el desarrollo de una propuesta arquitectónica si se escoge un material sobre otro? ¿Hierro colado? ¿o Acero dulce?... ¿La diferencia es solamente estética?, ¿funcional?, ¿O meramente económica? ... Quizás las preguntas más importantes que podríamos hacernos serían:

*“¿Cómo es que se comportan cada una de estas variables en mi construcción?, ¿Tienen éstas algún impacto sobre mi diseño?... ¿sobre mi credibilidad como profesional?”*

El desconocimiento teórico y práctico de cualquier técnica constructiva limita el hacer arquitectónico. El hacer arquitectónico ha evolucionado, pero nosotros no.

A pesar de que la Arquitectura de hoy en día tiene como respaldo siglos de desarrollo, el trabajo del Arquitecto suele presentar errores de diseño debido al desconocimiento de los materiales o procesos constructivos que él mismo ha propuesto para su obra.

#### 4.- Hipótesis.

Para automatizar la construcción y desarrollar Arquitectura impresa en 3D deben dominarse una máquina o herramienta, un material y una técnica constructiva, que basa sus principios en la tecnología de fabricación aditiva. Se conoce como Fabricación Aditiva a la tecnología o proceso aditivo de fabricación, que consiste en el agregado de materiales, ya sean estos depositados, apilados o aglutinados de manera sucesiva en una capa tras otra de material, esto con el fin de crear un elemento o producto tridimensional<sup>27</sup>.

Para hablar de una técnica constructiva mediante fabricación aditiva, es necesario contar con un lenguaje de impresión tridimensional y un lenguaje arquitectónico. En esta tesis entenderemos al “lenguaje de impresión tridimensional” como el conjunto de conocimientos que conforman la técnica de impresión tridimensional, es decir, el entendimiento de su práctica y el dominio de sus tecnicismos básicos. Entenderemos al “lenguaje arquitectónico” como el conjunto de conocimientos que un individuo adquiere a través del estudio de la profesión. En cuanto a “material”, lo entenderemos como el conjunto de materia en específica dosificación, útil para desarrollar elementos tridimensionales, y en cuanto a “herramienta”, nos referiremos a ella como el medio mecánico para llevar a cabo la fabricación de una obra.

En nuestro país podemos diseñar nuevos materiales, discutir sistemas constructivos e imprimir en 3D, pero aún no contamos con herramientas mexicanas que nos permitan pasar de la teoría, a la práctica de imprimir Arquitectura en un verdadero sitio constructivo: al sol en un baldío en el centro de la ciudad, a la lluvia en una colonia de escasos recursos, al polvo en una zona de desastre, a desarrollar y estudiar nuevas formas de desarrollar medio construido.

---

27 S. Lim et al., “Developments in Construction-Scale Additive Manufacturing Processes”, *Automation in Construction* 21 (enero de 2012): 262–68, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2011.06.010>.

Por lo anterior, en el presente documento se plantea la siguiente hipótesis:

*“Si fabricamos una herramienta capaz de extruir una mezcla de material, a través de una trayectoria predeterminada, de manera controlada por el usuario, entonces seremos capaces de producir, reproducir y personalizar una “Extrusión Lineal Ideal” (E.L.I.).*

Una Extrusión Lineal Ideal, en cuerpo, es un material. En forma, es producto de un sistema. Una mezcla de materiales para extrusión no es más que un mortero con características físicas y químicas específicas. Lo que hace de este material un producto útil para la construcción es la manera en la que se construye con él, es decir, la técnica.

Al entender que una extrusión lineal no es solamente un material inerte depositado sobre una superficie, sino que es “forma” en su definición más pura, entenderemos que el dominio de su deposición por consiguiente es “función”. La Arquitectura impresa en 3D tiene la capacidad de conjugar forma y función dentro de un mismo elemento estético<sup>28</sup>.

En conclusión, el objetivo general de esta investigación es desarrollar una herramienta, un sistema de extrusión que funcione como puente entre la teoría y la práctica de desarrollar Arquitectura impresa en 3D. El subproducto de dicha herramienta será una Extrusión Lineal Ideal, nuestra meta final. Las metas particulares de la investigación son estudiar, desarrollar y correlacionar los 4 componentes esenciales que conformarán nuestro producto:

1. Cabezal de extrusión.
2. Materiales para extrusión.
3. Eje de desplazamiento
4. Software de control

---

28 Sungwoo Lim et al., “FABRICATING CONSTRUCTION COMPONENTS USING LAYERED MANUFACTURING TECHNOLOGY”, s/f, 11.

## Capítulo 1

### Marco teórico

Para familiarizarnos con la idea de imprimir Arquitectura, es necesario entender lo siguiente:

1. Una impresión requiere de una mezcla de material que se diseña con fines químicos y físicos específicos. Este material se extruye y deposita sobre una superficie mediante un cabezal de extrusión.

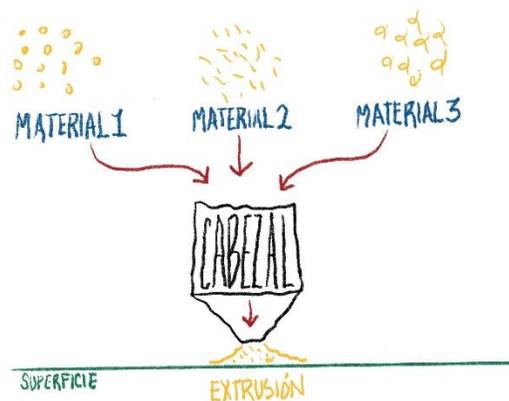


Imagen 1. *Básicos de impresión*. Esteban Pérez de León, 2022

2. La realización de un diseño arquitectónico impreso en 3D implica una trayectoria de impresión. Una trayectoria de impresión se podría entender como el camino que un cabezal de extrusión sigue mientras deposita material sobre una superficie.

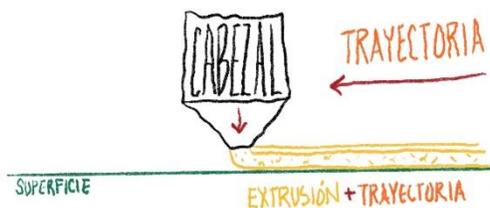


Imagen 2. *Trayectoria de impresión*. Esteban Pérez de León, 2022

3. El material depositado por el cabezal de extrusión, sobre una superficie y respetando determinada trayectoria, toma el nombre de “capa de impresión”.

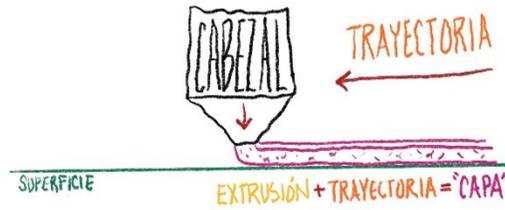


Imagen 3. Capa de impresión. Esteban Pérez de León. 2022

4. Esta técnica constructiva se basa en la superposición controlada de una serie de capas de material en un espacio tridimensional, a través de las cuales se genera un volumen. El volumen generado podría ser cualquiera que el usuario desee, desde un elemento sencillo como un muro, o una pieza de un elemento más complejo como un puente.

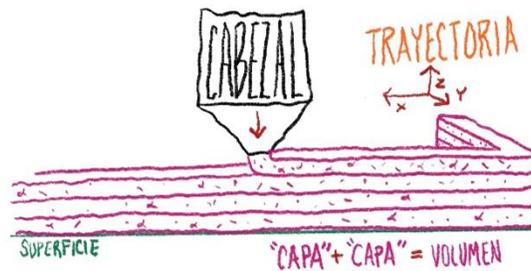


Imagen 4. Volumen de impresión. Esteban Pérez de León. 2022

La extrusión controlada de material en una trayectoria lineal es la base de la técnica constructiva mediante impresión tridimensional, “es lo que una piedra a una muralla” es nuestra “Extrusión Lineal Ideal”. Dominar el proceso de fabricación de una “E.L.I.” es el primer paso para desarrollar Arquitectura Impresa en 3D, es por esto por lo que su obtención a través del sistema es nuestra meta final.

En esta tesis, el término E.L.I. hace referencia a un cordón de material extruido cuya consistencia dimensional además de ser uniforme, presente un acabado superficial plano que permita una buena adhesión entre capas<sup>29</sup>.

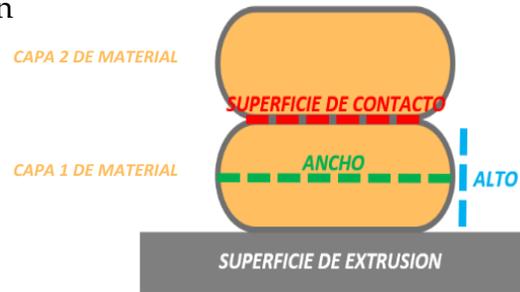


Imagen 5. Partes de una "E.L.I.". Esteban Pérez de León. 2022

El ancho de una capa de material aumentará dependiendo de qué tan prensado contra una superficie sea extruido y qué tanto pueda deformarse debido al peso de capas siguientes<sup>30</sup>. Las imágenes 6 y 7 demuestran esta idea de manera gráfica:

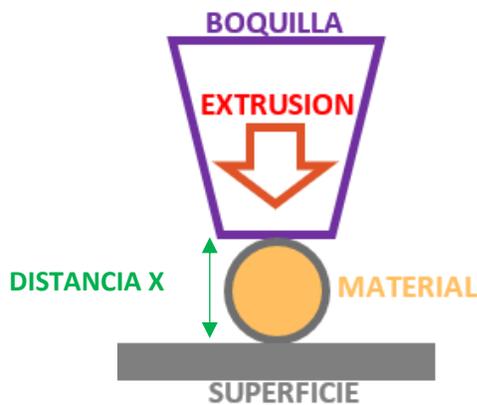


Imagen 6. "E.L.I."  $D=X$ . Esteban Pérez de León. 2022

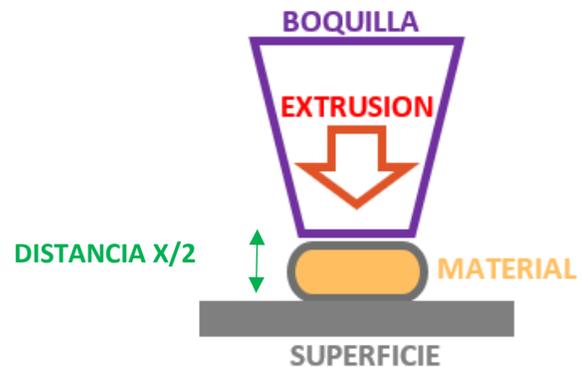


Imagen 7. "E.L.I."  $D=X/2$ . Esteban Pérez de León. 2022

Las dimensiones de una capa extruida no sólo responden a las características específicas de la mezcla, sino también a las necesidades de diseño estéticas y funcionales del elemento a desarrollar. Es importante mencionar que la estabilidad estructural de un conjunto de capas va en función del porcentaje de contacto que haya entre sí<sup>31</sup>.

29 Jianzhuang Xiao et al., "3D Recycled Mortar Printing: System Development, Process Design, Material Properties and on-Site Printing", *Journal of Building Engineering* 32 (noviembre de 2020): 101779, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101779>.

30 Xiao et al.

31 R.A. Buswell et al., "3D Printing Using Concrete Extrusion: A Roadmap for Research", *Cement and Concrete Research* 112 (octubre de 2018): 37–49, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.05.006>.

Si la superficie de contacto entre una capa de material extruida y una superficie previa es mínimo, el conjunto de capas no tendrá la capacidad de sostenerse por sí solo:

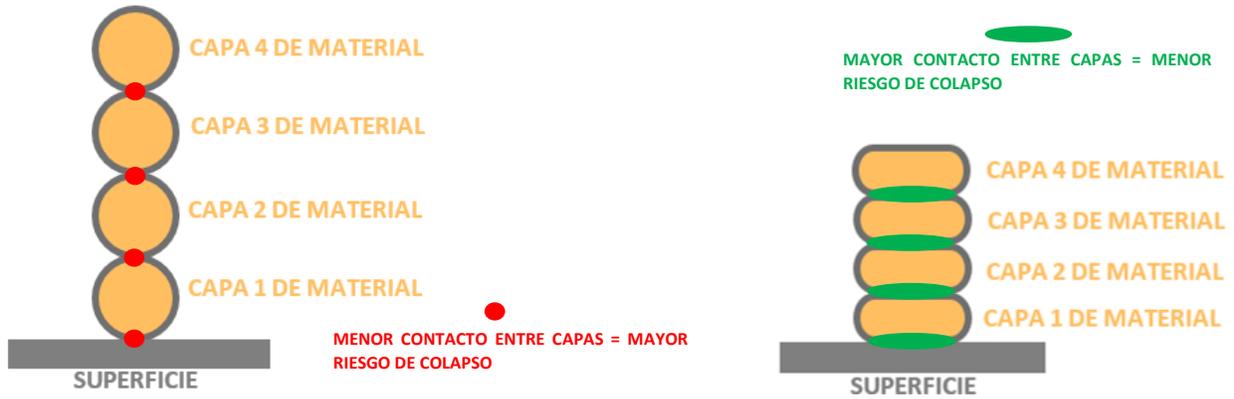


Imagen 8. *Riesgo de colapso entre capas*. Esteban Pérez de León. 2022

Imagen 9. *Apilabilidad en capas*. Esteban Pérez de León. 2022

Técnica y estéticamente hablando, nuestra E.L.I. deberá presentar los rasgos anteriormente mencionados para considerarla un elemento útil para el desarrollo de elementos tridimensionales mediante fabricación aditiva.

Para continuar con este trabajo es necesario conocer un poco de historia que hay de tras de la tecnología de fabricación aditiva, esto con el objetivo de contextualizar más profundamente el desarrollo de la presente investigación. Espero con el siguiente capítulo lograr aterrizar cualquier tipo de duda que pueda encontrarse presente en el lector.

## **Fabricación Aditiva: El antes, el ahora y el después.**

Hoy en día, para hablar de Fabricación Aditiva y prototipado rápido, debemos sumergirnos en el mundo del modelado y la fabricación digital, y para eso es necesario comprender en qué consiste cada uno de estos conceptos.

El Modelado y la Fabricación Digital son proceso de diseño y producción que combinan el Modelado Tridimensional (3DM por sus siglas en inglés) o el Diseño Asistido por Computadora (CAD) con la Fabricación Aditiva (AM) que describimos anteriormente, y la Fabricación Sustractiva (SM)<sup>32</sup>

La Fabricación Sustractiva o Manufactura Sustractiva es el proceso mediante el cual el objeto o forma final es obtenido de una pieza completa de material crudo. Este material debe representar el volumen total que contiene en sí la pieza. Algunos ejemplos de técnicas de fabricación sustractiva son el tallado, el esculpido tradicional o el torneado.

A pesar de compartir el mismo fin durante décadas, ambos procesos de manufactura han evolucionado a la par de nuevas tecnologías, muchas veces desarrolladas y muchas otras adaptadas por diversos personajes a lo largo de la historia. Este tipo de interacción entre la tecnología y la sociedad a través del tiempo han dado pie a un gran número de soluciones creativas para una misma necesidad de creación.

Para lograr una mejor comprensión del tema y ampliar el conocimiento con respecto a los orígenes del prototipado rápido, así como sus métodos y aplicaciones, se presentará a continuación un recorrido cronológico que nos permitirá empatizar con diversos descubrimientos llevados a cabo a lo largo de un tiempo y espacio histórico.

---

32 D.T Pham y R.S Gault, "A Comparison of Rapid Prototyping Technologies", *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 38, núm. 10-11 (octubre de 1998): 1257-87, [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(97\)00137-5](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(97)00137-5).

## **Fabricación Aditiva: Primeros Pasos, El Japón.**

La historia de la fabricación aditiva automatizada tiene sus orígenes en Japón en el año 1981. Tras una visita a una exposición de fotopolímeros, narra el sitio web del instituto de Ingenieros Electrónicos, Informáticos y de Comunicaciones (IEICE)<sup>33</sup>, Hideo Kodama, como miembro de esta institución y profesor del Instituto Municipal de Investigación Industrial de Nagoya, imaginó y plasmó en su camino a casa lo que sería la primera concepción de impresión tridimensional de la cual se tiene registro. Este producto del posible revuelo que, en su cabeza, su reciente visita había causado, además de su creciente interés en las tecnologías de diseño asistido por computadora.

A pesar de esto, la acogida, comercialización y patentado de su idea se vieron frenados por su propio contexto histórico y social, en el cuál, tecnologías como la impresión en dos dimensiones que hacían uso de tinta y papel, eran ya bastante costosas<sup>34</sup>.

La idea de Hideo Kodama para fabricar de manera automática modelos tridimensionales consistía en exponer polímeros líquidos fotosensibles a rayos ultravioleta.

Esta interacción solidificaría el material transformándole en una de las diversas capas componentes del objeto final. La forma y espesor de estas capas podían ser controladas mediante el ajuste de diversos factores como el movimiento de la plataforma de anclaje, el área de exposición a la luz (haciendo uso de máscaras), el tiempo de exposición a esta e incluso su nivel de intensidad<sup>35</sup>.

---

33 "Overview | IEICE The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers", consultado el 16 de enero de 2021, [https://www.ieice.org/eng\\_r/about/overview.html](https://www.ieice.org/eng_r/about/overview.html).

34 "Achievement Award 2014", consultado el 13 de enero de 2021, [https://www.ieice.org/eng/about\\_ieice/new\\_honorary\\_members\\_award\\_winners/2014/gyouseki\\_06e.html](https://www.ieice.org/eng/about_ieice/new_honorary_members_award_winners/2014/gyouseki_06e.html).

35 Hideo Kodama, "Automatic Method for Fabricating a Three-dimensional Plastic Model with Photo-hardening Polymer", *Review of Scientific Instruments* 52, núm. 11 (noviembre de 1981): 1770–73, <https://doi.org/10.1063/1.1136492>.

Podemos destacar de su invención 3 componentes esenciales:

1. Una fuente emisora de luz, característica muy importante de este proceso es la sencilla implementación y automatización de la aplicación del espectro ultravioleta, siendo este obtenido de lámparas de Mercurio (200 W) o Xenon (500 W).
2. Polímeros fotosensibles, habiendo utilizado el producto "Tevista" desarrollado y comercializado por "Tejin Ltd".
3. Ejes de movimiento, fueran estos verticales, horizontales, o una combinación de ambos. En este caso, Kodama utilizó un Plotter de fabricación comercial de ejes X/Y.

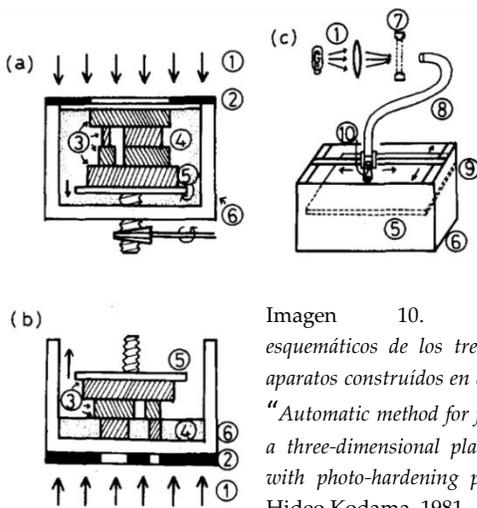


Imagen 10. Bosquejos esquemáticos de los tres tipos de aparatos construidos en el artículo: "Automatic method for fabricating a three-dimensional plastic model with photo-hardening polymer". Hideo Kodama. 1981

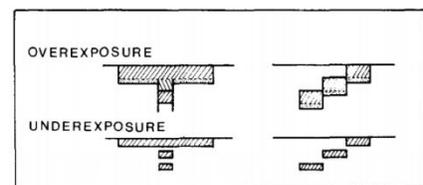


Imagen 11. Bosquejos esquemáticos de la solidificación causada por sobre exposición y poca exposición en el artículo: "Automatic method for fabricating a three-dimensional plastic model with photo-hardening polymer". Hideo Kodama. 1981

Es interesante notar como una pizca de creatividad fue suficiente para integrar bajo un mismo concepto los componentes seleccionados y utilizados por Kodama.

Ninguno de estos componentes fue desarrollado para el fin que Hideo Kodama les dio, imprimir en 3D, sin embargo, estos pasaron de cumplir funciones específicas determinadas por sus creadores originales, a formar parte de una herramienta o sistema cuya función y utilidad era completamente nueva.

## **Fabricación Aditiva: Primeros Pasos, Estados Unidos de América.**

Una noche de campamento a las orillas del río Chattooga, al Noreste de Georgia, sirvió como inspiración a un joven William Masters, quien, recostado, observaba las estrellas. Según el sitio web del propio inventor, este momento lo llevó a imaginar una estrella como: “Un punto de partida”, y agregó:

*“Uno podría agregar estrellas en cualquier dirección hasta obtener una figura deseada”<sup>36</sup>.*

De este modo fue que, en el año 1983, se sentaron las bases para el desarrollo de la Tecnología de Manufactura por medio de Partículas Balísticas (Ballistic Particle Manufacturing) o Fabricación Aditiva por medio de Partículas balísticas.

La idea original de William E. Masters, Ingeniero Eléctrico de la Universidad de Clemson, considerado padre de la Impresión Tridimensional<sup>37</sup> consistía en “disparar” desde un cabezal de dirección y posicionamiento controlado, una serie de partículas con el fin de obtener una figura deseada producto de un acomodo inteligente de las mismas.

Tras años de investigación y desarrollo, consiguió fijar su punto de partida al que llamó “partícula semilla” (32) al centro de una mesa de trabajo (30) dentro de un ambiente controlado (40). Los servomotores (20) y (22) se encargarían del posicionamiento de los cabezales de trabajo (24) y (26), de esta manera las partículas de masa serían inyectadas en puntos coordinados dentro del sistema de coordenadas para formar un artículo (34) materializado a partir del punto de origen (32). Este principio puede adaptarse a un gran número de sistemas de posicionamiento por coordenadas, así como a una gran variedad de ambientes controlados<sup>38</sup>.

---

36 “The Father of 3D Printing – Bill Masters”, consultado el 16 de enero de 2021, <http://billmasters3d.com/father-of-3d-printing/>.

37 “The Father of 3D Printing – Bill Masters”.

38 William E. Masters, Computer automated manufacturing process and system, United States US4665492A, filed el 2 de julio de 1984, y issued el 12 de mayo de 1987, <https://patents.google.com/patent/US4665492/en>.

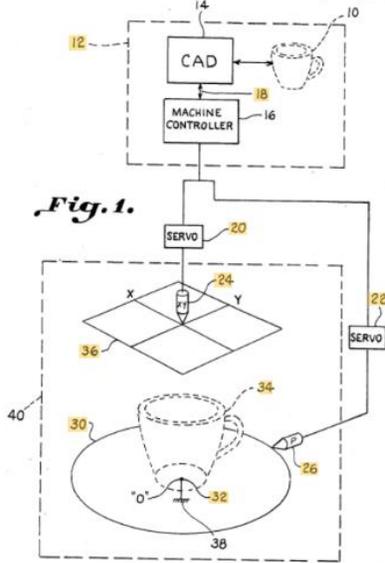


Imagen 12. Fig. 1, U.S. Patent 4,665,492. William E. Masters. 1987

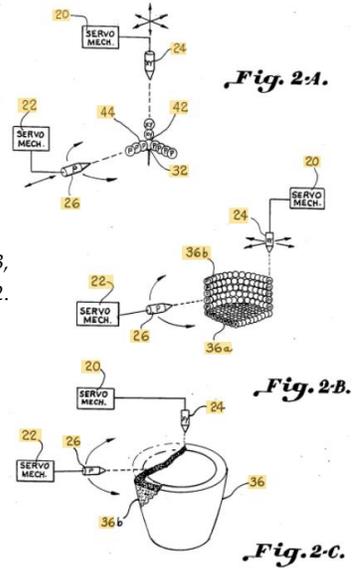


Imagen 13. Fig. 2-A, Fig. 2-B, Fig. 2-C, U.S. Patent 4,665,492. William E. Masters. 1987

William “Bill” Masters registró la primera patente de su tecnología de Fabricación Aditiva, su proceso de manufactura automatizada por computadora y su sistema en Julio 2 de 1984. Convirtiéndose esta en la primera patente de tecnología de fabricación aditiva automatizada registrada ante la Oficina Estadounidense de Patentes y Marcas Comerciales (U.S.P.T.O.).

### Fabricación Aditiva: Mismo año, mismo país, diferentes oportunidades.

Año 1983, Estados Unidos de América. Charles Wallas Hull se encontraba trabajando para una compañía que aplicaba recubrimientos curados a través de luz ultravioleta en superficies de mesas y otros muebles para su comercialización. Según narra él mismo en una entrevista llevada a cabo en el año 2013<sup>39</sup>, la idea de apilar un montón de capas curadas de este material, una encima de otra con el fin de moldear una figura deseada, nació de la necesidad de hacer más eficiente el proceso de producción de piezas plásticas. Estas piezas eran necesarias para el prototipado de nuevos artículos fabricados mediante

<sup>39</sup> Chuck Hull - Inventor, Innovator, Icon - The Story of How 3D Printing Came to Be., 2013, <https://www.youtube.com/watch?v=yQMJA45gFE>.

inyección, artículos cuyo proceso de fabricación llegaba a tardar meses debido a constantes errores de modelado y moldeo manual. Su propuesta fue tan bien recibida por la compañía que esta le montó un pequeño espacio de trabajo en el cuál consiguió desarrollar su idea. Fue así como la tecnología de Fabricación Aditiva por Estereolitografía (S.L.A.) nació.

La idea de Hull consistía en lo siguiente: Un rayo concentrado de luz ultravioleta (26) era proyectado en la superficie de una tina (21) repleta de un fotopolímero líquido (22). El rayo de luz, operado mediante control computacional (28), trazaba cada capa del objeto a producir en la superficie del líquido (23). En el momento en el que el rayo de luz tocaba la superficie, el fotopolímero líquido era polimerizado, transformándose en un sólido (30). Para llevar a cabo una impresión de este tipo, era necesario disponer de un modelo tridimensional diseñado por computadora, y, haciendo uso de software especializado, este modelo era rebanado en una serie de capas que serían solidificadas una a una en un proceso repetitivo de curado y nivelación de plataforma<sup>40</sup> El mismo proceso es utilizado hoy en día. El desarrollo de esta tecnología llevó a Chuck W. Hull a patentar su invento

el 8 de agosto de 1984 ante la U.S.P.T.O. Su idea le llevó a cofundar 3D Systems, empresa de Soluciones Tridimensionales<sup>41</sup>, de la cual es vicepresidente ejecutivo y director tecnológico en la actualidad.

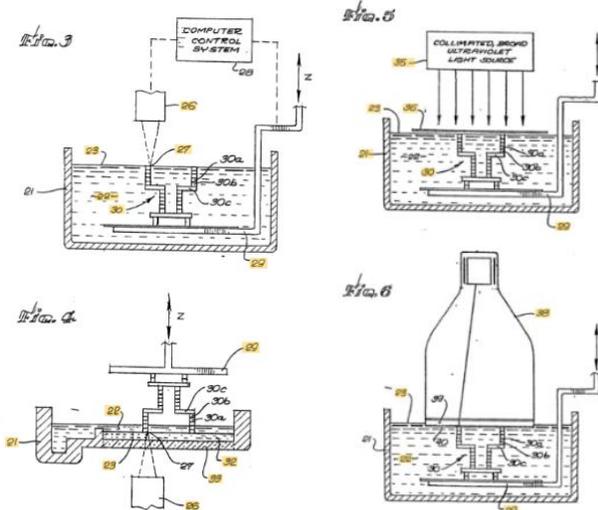


Imagen 14. Sección esquemática de la invención, European Patent 85109899.6. Charles W. Hull. 1993

Imagen 15. Secciones esquemáticas de la invención, mostrando otro tipo de configuración, European Patent 85109899.6. Charles W. Hull. 1993

<sup>40</sup> Charles W. Hull, Method and apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography, European Union EP0171069B1, filed el 6 de agosto de 1985, y issued el 18 de noviembre de 1993, <https://patents.google.com/patent/EP0171069B1/en?inventor=charles+w+hull&before=priority:19900101&after=priority:19800101>.

<sup>41</sup> "3D Printers, Software, Manufacturing & Digital Healthcare | 3D Systems", consultado el 5 de enero de 2023, <https://www.3dsystems.com/>.

## Fabricación Aditiva: Carl Deckard.

Carl Deckard arribó a la Universidad de Texas en Austin, en 1980. Cuatro años más tarde, al iniciar sus estudios de posgrado en el Departamento de Ingeniería Mecánica de la misma Universidad, compartió con su entonces profesor Joseph Beaman una idea que había rondado su cabeza durante un tiempo, con la esperanza de verla hecha realidad. Su idea consistía en utilizar un láser para fusionar entre sí una serie de capas de polvo de manera selectiva, con el fin de crear figuras complejas<sup>42</sup>.

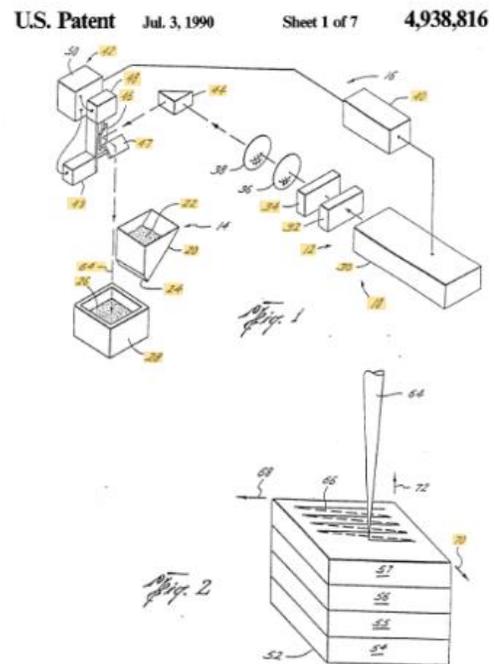


Imagen 16. U.S. Patent 4,938,816, Método y aparato para sinterización selectiva. Carl Deckard. 1989

El profesor Beaman junto con un grupo de investigadores ayudaron a Carl Deckard a desarrollar su idea, convirtiéndola en una realidad. Lograron fabricar y comercializar una de las primeras formas de “Impresión Tridimensional” llamada Sinterización por Láser Selectivo (S.L.S.)<sup>43</sup>. A más de 30 años de su creación, esta tecnología sigue siendo utilizada para la fabricación de piezas mecánicas para la industria aeronáutica y otros productos.

Carl Deckard patentaría su invención el 17 de octubre de 1986, en la cual se lee: “Un método y aparato para la sinterización selectiva de una capa de polvo, para producir una pieza compuesta de un conjunto de estas”.

<sup>42</sup> “US4944817.pdf”, s/f.

<sup>43</sup> Davide Sher, “Carl Robert Deckard, Inventor of SLS, Dies at 58”, *3D Printing Media Network - The Pulse of the AM Industry* (blog), el 30 de diciembre de 2019, <https://www.3dprintingmedia.network/carl-robert-deckard-inventor-of-sls-dies-at-58/>.

El aparato incluye un láser controlado por computadora cuya energía es dirigida al polvo para producir una masa sinterizada. La computadora puede ser capaz de determinar los límites deseados de sinterización para cada capa, permitiendo la selección de una determinada figura. En un proceso de agregado de capas de polvo y sinterización, una forma específica es formada”. Un primer acercamiento a la “Manufactura de Escritorio” se leía en el New York Times el 16 de marzo de 1988<sup>44</sup>



Imagen 17. BUSINESS TECHNOLOGY: ADVANCES; “From Screen to Solid 3-D Model In a Matter of Minutes”, extraído de los archivos del New York Times, 16 de Marzo de 1988.

<sup>44</sup> Peter H. Lewis, “BUSINESS TECHNOLOGY: ADVANCES; From Screen to Solid 3-D Model In a Matter of Minutes”, *The New York Times*, el 16 de marzo de 1988, sec. Business, <https://www.nytimes.com/1988/03/16/business/business-technology-advances-screen-solid-3-d-model-matter-minutes.html>.

## Fabricación Aditiva: Behrokh Khoshnevis, aquel que lo cambió todo.

El “Contour Crafting” o “Elaboración de Contornos” es una tecnología patentada de Fabricación Aditiva por extrusión de materiales desarrollada por el doctor Behrokh Khoshnevis, profesor de la universidad del sur de california. En el encabezado de su primera publicación al respecto, se leía: “Innovador proceso de prototipado rápido, capaz de generar figuras complejas de gran formato y superficies lisas en una gran variedad de materiales”. Hay que recordar que, para este entonces, 1998, las tecnologías de fabricación aditiva eran ya una realidad palpable y patentada sujeta a constantes mejoras tanto de operación de sistemas como de rendimiento de materiales o acabados estéticos de las piezas materializadas. Fue este último el factor clave que dio pie a la investigación del Dr. Khoshnevis.

Khoshnevis sostenía que el acabado superficial de una pieza elaborada mediante técnicas de fabricación aditiva es un factor clave que debe ser abordado en la mayoría de los procesos de prototipado rápido. Las superficies de los componentes creados mediante estas tecnologías son por lo general rugosas, debido a que estos son materializados capa por capa, y, en algunas técnicas, las capas son generadas punto por punto<sup>45</sup> Esta rugosidad ilustrada en la imagen 18 presenta por lo general una geometría proporcional al grosor de cada capa. Los métodos comúnmente utilizados para reducir esta rugosidad incluyen la reducción del peralte de capa y/o el uso de lijado post fabricado.

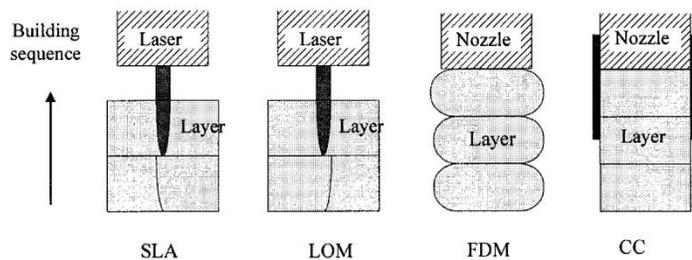


Imagen 18. Corte comparativo de acabados en capas. Behrokh Khoshnevis. 2006

45 Behrokh Khoshnevis y Rosanne Dutton, “Innovative Rapid Prototyping Process Makes Large Sized, Smooth Surfaced Complex Shapes in a Wide Variety of Materials”, *Materials Technology* 13, núm. 2 (enero de 1998): 53–56, <https://doi.org/10.1080/10667857.1998.11752766>.

La propuesta del Dr. Khoshnevis era sencilla; su sistema utilizaba control computacional para explotar la capacidad de alisado de superficies mediante el uso llanas montadas a los costados de su cabezal de extrusión, de esta manera, se obtendrían mejores acabados en superficie y mayor velocidad de fabricación. A pesar de que los primeros objetos fabricados mediante esta tecnología fueron producidos en Poliestireno, su proceso planteaba de manera teórica el uso de una gran variedad de materiales como resinas, composites o cerámicos, además de un sistema inteligente de inyección y vaciado de los mismos<sup>46</sup>. Cabe mencionar que la propuesta desarrollada por el Dr. Khoshnevis permite, sí, un control en el acabado final de un material, siempre y cuando este permanezca suficientemente maleable para ser moldeado.

### **Fabricación Aditiva: Un Contour Crafting Maduro.**

Año 2001, al paso de 3 años de maduración tecnológica el Dr. Khoshnevis decidió llevar a cabo una investigación experimental que le llevó a combinar su proceso de fabricación aditiva con el uso de materiales cerámicos. La idea era la siguiente: Combinar un proceso de extrusión, utilizado para conformar los contornos de un objeto, junto con un proceso de relleno (a modo de inyección o vaciado) utilizado para generar el núcleo interno del objeto en cuestión<sup>47</sup>. A este proceso le llamaría después “método híbrido” dentro de su proceso de fabricación<sup>48</sup>.

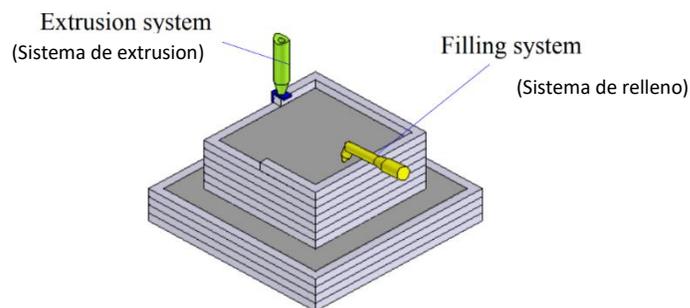


Imagen 19. Mecanismo de extrusión y relleno. Behrokh Khoshnevis. 2005

46 Khoshnevis y Dutton.

47 Behrokh Khoshnevis et al., “Experimental Investigation of Contour Crafting Using Ceramics Materials”, Rapid Prototyping Journal 7, núm. 1 (marzo de 2001): 32–42, <https://doi.org/10.1108/13552540110365144>.

48 Behrokh Khoshnevis, “Automated Construction by Contour Crafting—Related Robotics and Information Technologies”, Automation in Construction 13, núm. 1 (enero de 2004): 5–19, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2003.08.012>.

La experimentación fue llevada a cabo haciendo principal uso de dos materiales: el yeso y la arcilla. Esta derivó en una mejor comprensión física y experimental de la influencia que varios parámetros de diseño identificados, podrían ejercer en un producto final. Producto de los prometedores avances que esta tecnología suponía para el Dr. Khoshnevis, diversas líneas de estudio comenzaron a aparecer ante sus ojos.

Interrogantes como la capacidad de compresión de un objeto fabricado mediante Contour Crafting, la teórica capacidad de crear superficies geométricas complejas y el mismo proceso de mejoramiento de la tecnología llevaron al Dr. Khoshnevis a ubicar su sistema dentro de un nicho específico de fabricación, un nicho rezagado, sin lugar a duda, de los beneficios que la automatización ya aportaba a otros dominios de producción; la construcción<sup>49</sup>

### **Fabricación Aditiva: Construcción Automatizada**

Año 2004. Tras notar el rezago tecnológico que el campo de la construcción sufría, y al ser consciente de la incapacidad de los métodos de manufactura automática contemporáneos y convencionales para construir largas estructuras con características interiores específicas<sup>50</sup>, el Dr. Behrokh Khoshnevis identificó su sistema de fabricación como potencial generador automatizado de estructuras constructivas completas, así como de sus subcomponentes.

La idea del Dr. Khoshnevis, esa idea nacida en laboratorio cuyos primeros resultados fueron pequeñas estructuras cilíndricas de Poliestireno extruido, producto de burdos sistemas de control y código recién escrito en el computador, había madurado. Su idea maduró al punto de considerarle un proceso capaz de construir de manera automatizada, una casa o hasta una colonia...

---

<sup>49</sup> Khoshnevis.

<sup>50</sup> Khoshnevis.

*“Dotándole incluso, a cada una, de un diseño distinto y construidas quizás, en una sola exhibición” ... “Dentro de sí, en cada uno de los muros que les compondrían, se encontrarían listos ductos eléctricos, de plomería y hasta de aire acondicionado”.*

¿De qué manera pensaba lograrlo? Haciendo uso de su método Híbrido de fabricación. Es decir, combinaría un proceso de extrusión para conformar las superficies de un objeto junto con un proceso de relleno que conformaría el núcleo interno del mismo. El proceso de extrusión construye los bordes de cada capa de la figura dotándoles al mismo tiempo de un acabado liso. Tras la completa extrusión de cada sección cerrada de una capa determinada, y de ser necesario, material de relleno sería vertido al interior para darle rigidez a la estructura. Tratándose de una aproximación constructiva, el material utilizado sería concreto.

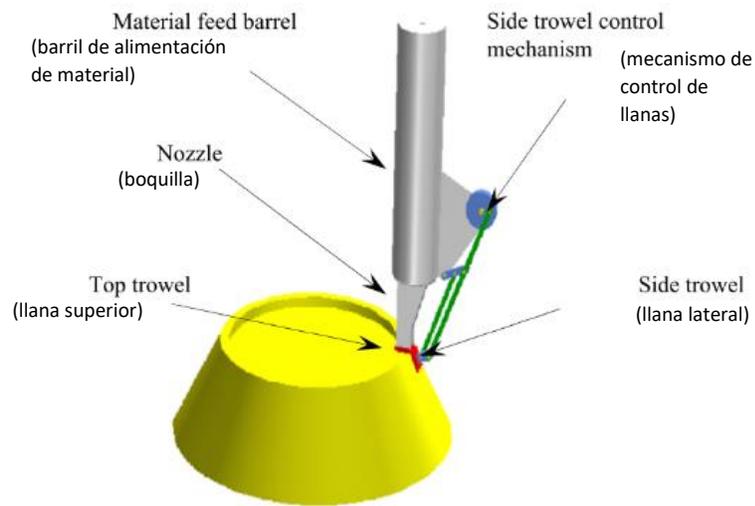


Imagen 20. *Proceso del Contour Crafting*. Behrokh Khoshnevis.2004

La imagen 20 muestra un cabezal de extrusión en cuyo extremo se encuentra fija una llana superior y una lateral conformando una “L” invertida (rojo), cuyo posicionamiento y ángulo de apertura es controlado por computadora. Estos son los componentes básicos del Contour Crafting, el control de una herramienta capaz de moldear una superficie dependiendo de su posicionamiento con respecto al flujo y maleabilidad de un material.

Tras un año de investigación, en el año 2005, el Dr. Khoshnevis y su equipo publicaron un avance mayor con respecto a su investigación. El sueño de edificar construcciones haciendo uso del Contour Crafting debía comenzar por alguna parte; fue así como el equipo fabricó un sistema simple, conformado por los siguientes componentes:

1. Un cabezal de extrusión compuesto por un depósito de reserva de material y un pistón accionado por un tornillo guía, cuya velocidad constante de rotación extruiría cantidades controladas de material a través de la boquilla del sistema.
2. Un sistema de control de posicionamiento de 3 ejes, X, Y, Z, el cual permitiría el depósito coordinado de cantidades controladas de material en un espacio de actuación determinado.

Mientras el mortero fluye a través de la boquilla de extrusión, el sistema de control de posicionamiento se encarga de transportarlo a una velocidad específica a través de un camino predeterminado sobre el eje X. Una vez que el recorrido se completa, el cabezal de extrusión es elevado automáticamente sobre el eje Z por el sistema de posicionamiento para la deposición de la siguiente capa de fabricación<sup>51</sup>.

El sistema se utilizó para la elaboración automatizada de un muro diseñado por el equipo, esto con el fin de llevar a cabo una demostración a escala 1:1 del potencial que el Contour Crafting tenía en la construcción. Esta propuesta de muro fue producto de un análisis de los componentes que integran el proceso tradicional de colado de concreto de un elemento estructural en una construcción <sup>52</sup>.

---

51 Behrokh Khoshnevis et al., "Mega-Scale Fabrication by Contour Crafting", *International Journal of Industrial and Systems Engineering* 1, núm. 3 (2006): 301, <https://doi.org/10.1504/IJISE.2006.009791>.

52 Dooil Hwang y Behrokh Khoshnevis, "An Innovative Construction Process-Contour Crafting (CC)" (22nd International Symposium on Automation and Robotics in Construction, Ferrara, Italy, 2005), <https://doi.org/10.22260/ISARC2005/0004>.

Los muros de concreto suelen construirse rellendo “formas”<sup>53</sup>. Para fabricar un muro de concreto de manera tradicional, se hace necesario utilizar una cimbra y todos los elementos extras necesarios para que esta contenga un volumen de material hasta que este cure. Teniendo en cuenta la importancia del proceso de cimbrado para el colado de concreto en la construcción, el equipo del Dr. Khoshnevis diseñó en 2006 un elemento constructivo producto no sólo de las capacidades del sistema de Contour Crafting e investigaciones previas, sino también:

*“Del propio entendimiento que el equipo tenía sobre la construcción...Khoshnevis no es Arquitecto...”*

Este muro se convertiría en el primer elemento constructivo creado mediante fabricación aditiva.

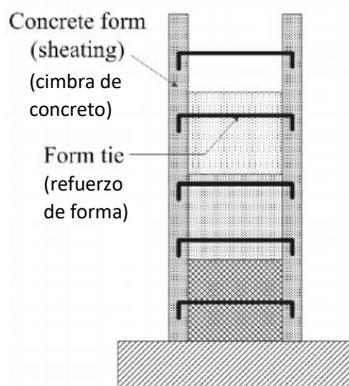


Imagen 21. Esquema de muro elaborado mediante Contour Crafting. Behrokh Khoshnevis. 2006

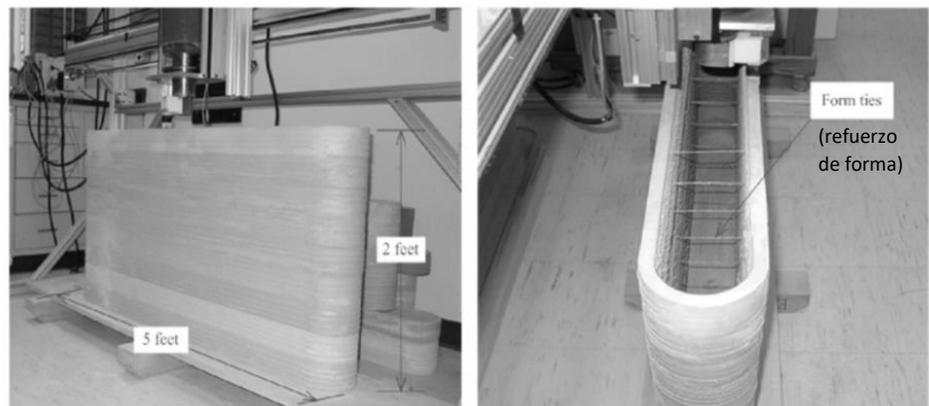


Imagen 22. Muro de concreto elaborado mediante Contour Crafting. Behrokh Khoshnevis. 2006

Para el diseño de la forma, los muros perimetrales del elemento fueron construidos haciendo uso de una mezcla específica de mortero y fueron “amarrados” transversalmente con elementos de refuerzo en forma de “U” fabricados a medida.

Estos elementos funcionarían como los amarres de alambón encontrados comúnmente en una preparación de cimbrado tradicional. Dichos refuerzos fueron insertados

53 Khoshnevis et al., “Mega-Scale Fabrication by Contour Crafting”.

manualmente entre las capas extruidas por el sistema de Contour Crafting a cada 12 pulgadas en sentido horizontal y a cada 5 pulgadas en sentido vertical, como es ilustrado en la imagen 23.

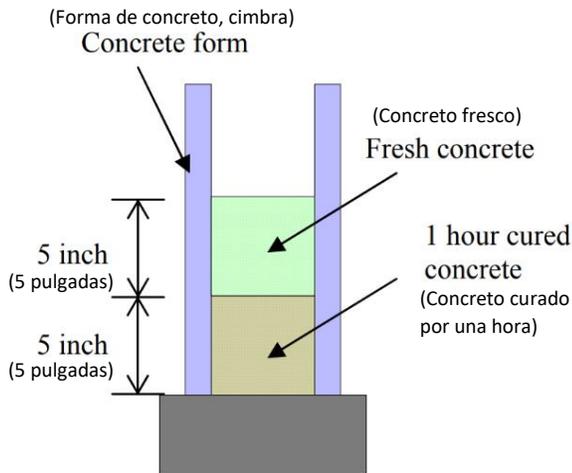


Imagen 23. Procedimiento de depósito de concreto. Behrokh Khoshnevis. 2005



Imagen 24. Depositando concreto fresco, capa por capa. Behrokh Khoshnevis. 2005

Un lote de concreto sería vertido al interior del muro cada que la superposición de capas que le conforman llegara a una altura de 5 pulgadas. Un segundo lote de material sería vertido sobre el primero al transcurso de una hora, tiempo suficiente para llevar al material a curar y endurecer a un punto en el cual la presión lateral ejercida por el volumen de este fuese soportada por su propio contorno, "...haciendo innecesario el uso de otros elementos tradicionales de refuerzo"<sup>54</sup>.

Esta propuesta podría considerarse más sencilla que la propuesta de cimbrado tradicional, ya que, además de tratarse de un proceso automatizado, este hace uso de solamente 2 componentes: el confinamiento de la "figura" (cimbra) que, en sí, es su propia superficie, y, refuerzos transversales.

En pocas palabras, la primera propuesta que el Contour Crafting ofreció al nicho de la construcción automatizada en el año 2006, consistía en extruir y apilar una serie de capas

54 Khoshnevis et al.

de mortero de manera automatizada (por lo general en sentido vertical), para así generar un molde, o “el cuerpo vacío de un objeto”, que, a su vez, sería relleno y reforzado a conveniencia.

### Fabricación Aditiva: El Gran Salto

Un salto en el tiempo nos lleva al año 2012, un año que marcaría el antes y el después de la investigación de tecnologías de fabricación aditiva enfocadas a la construcción.

Durante los primeros 16 años que conforman el estudio del tema, del año 1997 al 2012, se llevaron a cabo alrededor del mundo, un total de 42 publicaciones al respecto. Del año 2013 al 2016 se llevaron a cabo un total de 73 publicaciones, poco menos del doble de las llevadas a cabo en el periodo anterior, en tan sólo 3 años. Hasta el año 2006, eran más comunes los resúmenes de conferencia que los artículos científicos y fue a partir del año 2009 que la publicación de estos incrementó<sup>55</sup>, Pero ¿Por qué?, ¿Qué sucedió en los años 2009 y 2012 que aumentó el interés de la comunidad científica en el tema?

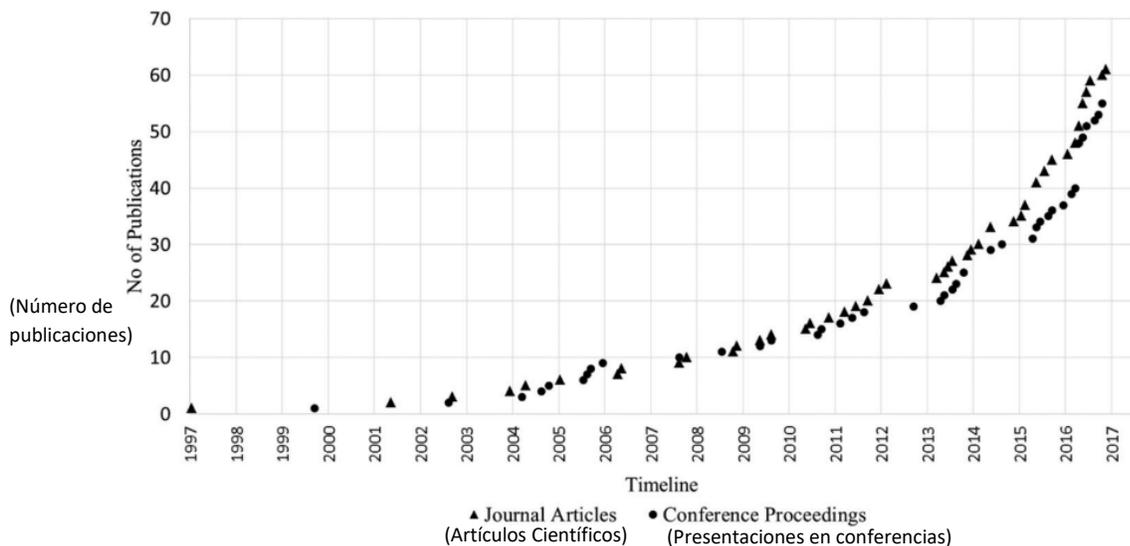


Imagen 25. Tendencia de publicaciones con respecto a la impresión tridimensional en la construcción. Yi Wei Daniel Tay et al. 2017

55 Yi Wei Daniel Tay et al., “3D Printing Trends in Building and Construction Industry: A Review”, Virtual and Physical Prototyping 12, núm. 3 (el 3 de julio de 2017): 261–76, <https://doi.org/10.1080/17452759.2017.1326724>.

Esta pregunta nos remonta al año 2009, año en el cuál la patente estadounidense no. US5121329A de S. Scott Crump para Stratasys Inc.<sup>56</sup> caducó. A pesar de ser una patente relacionada con la fabricación aditiva y no con su uso en la construcción, esta poseía los principios básicos de deposición inteligente de materiales apoyada en un sistema de movimiento automatizado de 3 ejes X, Y, Z. Este evento derivó en un “boom” tecnológico comercial y ha sido identificado por varios autores como Attaran <sup>57</sup> y Nadal<sup>58</sup> como el principal causante del repentino y acelerado crecimiento y desarrollo de esta tecnología, factores que la hicieron más eficiente y costo efectiva. Podemos suponer que la relevancia adquirida, derivó en un incremento en el interés por sus subtemas, siendo uno de estos, su uso en la construcción.

Demos un salto en el tiempo al año 2013, año que trajo consigo una publicación<sup>59</sup> que considero la más interesante de todas las hechas por el Dr. Khoshnevis y su equipo.

Tras un proceso de maduración de 16 años, el Dr. Khoshnevis presentaba en su artículo: *Operación optima de maquinaria para la construcción mediante Contour Crafting* una metodología sistematizada para desarrollar edificaciones haciendo uso de su método de fabricación aditiva.

Podríamos resaltar muchos aspectos de esta publicación, como por ejemplo el grado de desarrollo tecnológico que presentan sus herramientas o la evolución de sus materiales. Sin embargo, es la integración de un vocabulario arquitectónico-constructivo, por parte de un ingeniero industrial, un hecho transdisciplinario puro que considero la más grande de sus aportaciones. ¿Qué pasa si hacemos lo mismo, pero al revés?

---

56 S. Scott Crump, Apparatus and method for creating three-dimensional objects, United States US5121329A, filed el 30 de octubre de 1989, y issued el 9 de junio de 1992, <https://patents.google.com/patent/US5121329A/en>.

57 Mohsen Attaran, “The Rise of 3-D Printing: The Advantages of Additive Manufacturing over Traditional Manufacturing”, *Business Horizons* 60, núm. 5 (septiembre de 2017): 677–88, <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2017.05.011>.

58 Adolfo Nadal Serrano, “Más Allá Del Prototipado Rápido: Automatización Robótica de Impresión 3D Para La Construcción”, *s/f*, 234.

59 Jing Zhang y Behrokh Khoshnevis, “Optimal Machine Operation Planning for Construction by Contour Crafting”, *Automation in Construction* 29 (enero de 2013): 50–67, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.08.006>.

## **Fabricación Aditiva: Barcelona y su Arquitectura Impresa en 3D.**

El Instituto de Arquitectura Avanzada de Cataluña (I.A.A.C.) es un centro internacional dedicado a la investigación, educación, producción y divulgación. Su misión es imaginar y estudiar el futuro hábitat de nuestra sociedad mientras lo construye en el presente<sup>60</sup>

Este instituto, con sede en Barcelona, ofrece una variedad de programas multidisciplinarios a través de los cuales son explorados diversos fenómenos urbanos y de territorio, prestando especial atención a nuevas oportunidades y haciendo énfasis en los valores culturales, económicos y sociales que la arquitectura puede aportar a la sociedad.

### **Arquitectura Impresa en 3D: I.A.A.C. - O.T.F.**

Con el fin de explorar las nuevas oportunidades otorgadas por la tecnología de Fabricación Aditiva, en 2015, el Instituto de Arquitectura Avanzada de Cataluña creó a través del programa Open Thesis Fabrication (O.T.F.), el Posgrado en Arquitectura Impresa en 3D. Un programa intensivo de 6 meses en el campo de la Fabricación Aditiva enfocada a la construcción sustentable<sup>61</sup>. El programa busca desarrollar soluciones tecnológicas y arquitectónicas de enfoque prospectivo en colaboración con su propio gobierno y el de otras ciudades y regiones europeas, grupos industriales y centros de investigación como el Instituto de Tecnología de Massachusetts (M.I.T.)

Su intención es desarrollar una metodología de diseño holístico para la arquitectura para lo cual hacen uso de distintos conocimientos provenientes de áreas de estudio como la fabricación robótica, la ingeniería de materiales y el diseño basado en la funcionalidad. Este programa se basa en la investigación aplicada, su meta es aplicar tecnología de punta

---

60 "ABOUT IAAC - Institute for Advanced Architecture of Catalonia", IAAC (blog), consultado el 4 de enero de 2023, <https://iaac.net/iaac/about/>.

61 "Postgraduate in 3D Printing Architecture - IAAC Barcelona", IAAC (blog), consultado el 4 de enero de 2023, <https://iaac.net/educational-programmes/applied-research-programmes/otf-3d-printing-architecture/>.

que desafíe el paradigma actual de la construcción, a través de su constante desarrollo, estudio y retroalimentación<sup>62</sup>.

El éxito del programa depende del trabajo transdisciplinario resultado de los esfuerzos de un colectivo integrado por diversos especialistas del propio I.A.A.C. y alumnos con distintos intereses en campos como la impresión tridimensional, el desarrollo de materiales, y diseño arquitectónico. El curso se estructura en 3 fases: Investigación, diseño y construcción, a través de las cuales se busca que los participantes adquieran conocimientos teórico-prácticos en materia de Fabricación Digital, Herramientas Digitales, Investigación de Materiales, Metodología de Diseño y Diseño Integral de Soluciones Arquitectónicas a través de esta tecnología, tomando en cuenta materiales, uso energético, economía, normatividad, usuarios, clima, diseño, estructura, etc.



Imagen 26. Módulos impresos del proyecto Terra Performa. I.A.A.C. - O.T.F. 2017

---

62 "Postgraduate in 3D Printing Architecture - IAAC Barcelona".

## Arquitectura Impresa en 3D: I.A.A.C - Digital Adobe.

Digital Adobe es un proyecto de investigación enfocado a la producción de soluciones arquitectónicas haciendo uso de materiales naturales y fabricación aditiva. La tecnología utilizada, desarrollada a través del programa O.T.F., hace posible la completa customización de la forma de una edificación o estructura a distintas escalas. El diseño exterior y la resolución de su sección interior permite la fabricación de un elemento dotado de características estructurales y pasivo-climáticas de alto rendimiento.<sup>63</sup>



Imagen 27. *Ensamble final del proyecto Digital Adobe. I.A.A.C. – O.T.F. 2018*

El proyecto promueve la eficiencia constructiva y de materiales al desplegar robots “en sitio” que posibilitan hacer uso de los materiales naturales locales obtenidos en el sitio de la construcción. Ejemplo de esto fue el uso de una mezcla local de arcilla, la cual se empleó para desarrollar prototipos a menor escala, cuyo análisis sirvió para verificar el comportamiento estructural y climático del diseño propuesto.

---

<sup>63</sup> “Digital Adobe”, IAAC (blog), consultado el 4 de enero de 2023, <https://iaac.net/project/digital-adobe/>.

Tras una serie de ajustes, se llevó a cabo la construcción de un prototipo a escala 1: 1 que fue instalado en el “Laboratorio Autosuficiente de Valldaura”, propiedad del mismo I.A.A.C.

El proyecto consiste en un muro de arcilla extruida, de 2 metros de ancho y 5 metros de alto, y de espesor variable (.7m en la parte inferior y 0 m en la parte superior) orientado al sur. A una altura de 2.6m, un piso de madera se encuentra empotrado a la pared, con el fin de simular un sistema constructivo mixto arcilla/madera donde se pueden probar las conexiones entre los dos materiales y la carga vertical de la losa horizontal. Es una estructura autoportante en la que el espesor de la pared y la geometría de sus 6 capas están diseñadas para adaptarse a sus necesidades estructurales<sup>64</sup>. El muro está diseñado de acuerdo con el clima local, teniendo en cuenta la incidencia solar, las temperaturas anuales y la humedad.

### **Arquitectura Impresa en 3D: I.A.A.C – Terra Performa.**

El proyecto Terra Performa se enfoca en la impresión tridimensional a gran escala, estudiando la influencia que tiene el uso de materiales naturales como barro y arcilla en la construcción bioclimática.

Las construcciones de tierra son una técnica ancestral basada en el uso de materiales locales cuya huella de carbono es relativamente cero. La tierra es un material usado a nivel mundial cuyas propiedades térmicas aplicadas a la arquitectura permiten el desarrollo de espacios interiores confortables. Otra propiedad interesante de la tierra es su capacidad de absorción y evaporación, que propicia un entorno de autorregulación de humedad resultando en un clima saludable.

---

<sup>64</sup> “Digital Adobe”.

A pesar de estos y otros beneficios, el uso de la tierra suele encontrarse estigmatizado puesto que suele asociarse con los métodos tradicionales de construcción de las regiones subdesarrolladas del mundo<sup>65</sup>.

A través de la integración de este material con la tecnología contemporánea, el proyecto busca demostrar el potencial de la tierra como material constructivo de actualidad, como posible base para desarrollar cualquier tipo de arquitectura.

Mientras la impresión tridimensional posibilita la fabricación de geometrías complejas, la inteligencia del diseño proviene de la constante optimización de este. Es así como la adquisición de “formas de alto rendimiento” se hace más sencilla.



Imagen 28. *Proceso de impresión de módulos para proyecto Terra Performa. I.A.A.C. – O.T.F.2017*

---

65 “TerraPerforma - Institute for Advanced Architecture of Catalonia”, IAAC (blog), consultado el 11 de octubre de 2020, <https://iaac.net/project/terraperforma/>.

El desarrollo del proyecto comenzó con el estudio de los fenómenos climáticos de la zona y el comportamiento de diversos materiales tras interactuar con estos. Una vez obtenida esta información, una serie de pruebas físicas y simulaciones digitales con software especializado como Rhino CFD, Ladybug y Karamba fueron llevadas a cabo para desarrollar prototipos aptos para experimentación. A estos prototipos les fueron aplicadas pruebas de absorción de radiación solar, conductividad, convección y masa térmica además de pruebas de comportamiento estructural.

Para el prototipo final se concluyó que una propuesta modular fabricada en laboratorio y transportada al sitio resultaría mejor que una fabricada “en sitio”, esto debido a las dificultades que presentaba el traslado del robot y su exposición a la intemperie. Los módulos resultantes fueron concebidos mediante diseño paramétrico, a través del cual se les dotó de características geométricas específicas que les harían interactuar de manera óptima con su entorno de manera individual y en conjunto. La fachada resultante fue concebida como una gradiente en sentido vertical y horizontal que permite el auto sombreado necesario en la región para optimizar la ganancia de radiación solar al Este y al Oeste.

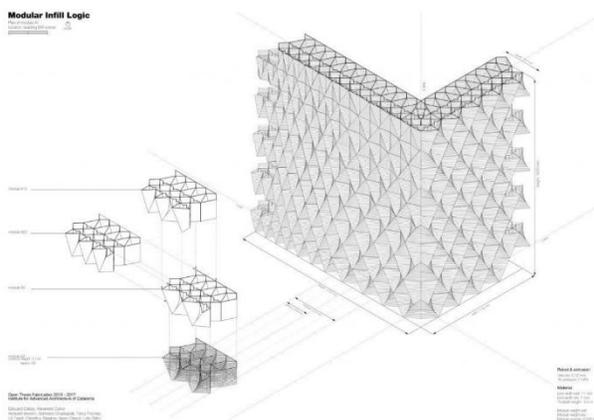


Imagen 29. *Diseño esquemático del proyecto Terra Performa.*  
I.A.A.C. – O.T.F. 2017



Imagen 30. *Ensamble final del proyecto Terra Performa.*  
I.A.A.C. – O.T.F. 2017

## **Arquitectura Impresa en 3D: I.A.A.C – Building Architecture Continuity.**

Para la edición 2019 del programa O.T.F., se buscó desarrollar un sistema constructivo sostenible y estructuralmente estable utilizando procesos de tecnología de fabricación aditiva 0 km. El proyecto “Building Architecture Continuity” hace uso de geometrías voladizas y técnicas de impresión continua para mejorar las capacidades estructurales y la calidad estética y espacial del producto final<sup>66</sup>.

Previo un análisis estructural de las posibilidades geométricas que pueden ser creadas mediante fabricación aditiva, el I.A.A.C. diseñó una serie de “módulos tipo” combinables y manipulables para crear un catálogo de geometría de superficies funcionales para la arquitectura impresa en 3D.

Haciendo uso de este catálogo de formas, los estudiantes seleccionaron como base de diseño siete módulos cuya verticalidad con respecto al piso era la misma, pero poseían diferentes grados de curvatura en su forma. Esto les permitió conectar los módulos unos con otros a la perfección, como un rompecabezas.

El resultado final consistió en una serie de elementos funcionales, como muros, arcos, columnas y vanos útiles para desarrollar elementos como habitaciones. La combinación de estos elementos, sus cualidades estructurales, geométricas y funciones específicas tienen la capacidad de generar un sinnúmero de soluciones arquitectónicas.

La capacidad del sistema, de extenderse infinitamente de manera horizontal fue la que le dio el nombre de “Arquitectura de Continuidad”.

---

<sup>66</sup> “Building Architecture Continuity”, IAAC (blog), consultado el 4 de enero de 2023, <https://iaac.net/project/building-architecture-continuity/>.

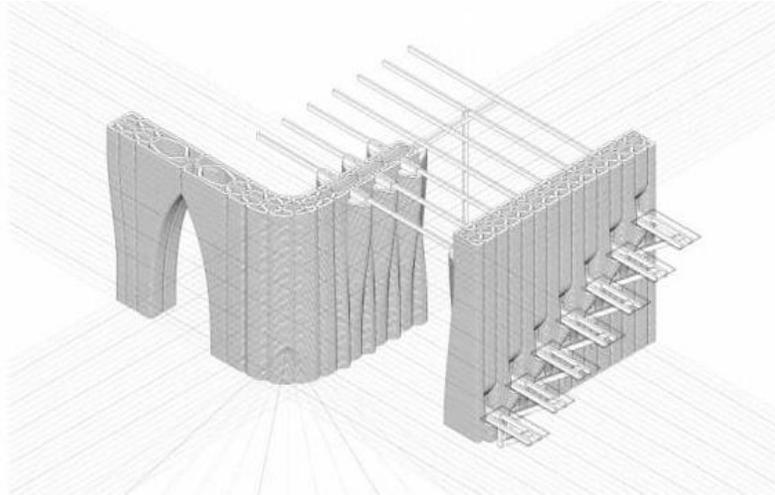


Imagen 31. *Diseño esquemático del proyecto Building Architecture Continuity.*  
I.A.A.C. – O.T.F. 2019

Uno de los elementos diseñados, parte del catálogo de piezas interconectables, fue un muro en cuya geometría se encuentra integrado un sistema de soporte para escaleras. Tras una fase de diseño de prueba y error y la creación de una serie de modelos a escala que permitieron un mejor entendimiento geométrico y de materiales, el equipo consiguió imprimir el elemento a tamaño real 1:1, en colaboración con la empresa WASP<sup>67</sup>, en Italia, utilizando material de la región.



Imagen 32. *Ensamble final del proyecto Building Architecture Continuity.*  
I.A.A.C. – O.T.F. 2019

67 "Stampanti 3D | WASP | Azienda leader nel settore della stampa 3D", consultado el 4 de enero de 2023,  
<https://www.3dwasp.com/>.

## Arquitectura Impresa en 3D: Construction of Buildings on Demand (COBOD).

COBOD es una empresa europea fundada por Henrik Lund-Nielsen en el año 2015 y es líder en el mercado de sistemas de fabricación aditiva para la construcción.

En 2017 fueron los encargados de desarrollar y construir bajo normatividad europea el primer edificio impreso tridimensionalmente en Dinamarca, haciendo uso de la “B.O.D”, “Building On Demand” una máquina que presenta un área de impresión de 50 metros cuadrados<sup>68</sup>.

El diseño de esta edificación es meramente orgánico, los únicos elementos rectos del proyecto son los vanos de ventanas y puertas. Parte de la cimentación también fue diseñada para su impresión. El objetivo del proyecto fue demostrar de manera práctica como la tecnología de impresión tridimensional podía ser aplicada a la industria de la construcción tradicional en Europa.

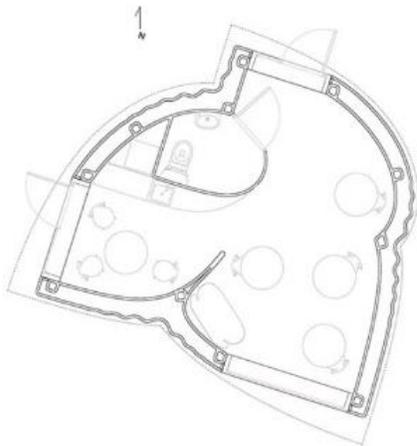


Imagen 33. Planta de la casa B.O.D. COBOD. 2017



Imagen 34. Render de la casa B.O.D. COBOD. 2017

La aportación principal de la compañía ha sido el desarrollo de su sistema robótico de impresión tridimensional para la construcción, que, al ser modular, es más fácil de mantener, transportar y armar.

---

68 PERI, “The BOD Building”, consultado el 4 de enero de 2023, <https://www.peri-usa.com/3d-constructionprinting/the-bod-building.html>.

Tras una inversión de grupo alemán “PERI”, la compañía consiguió rediseñar su impresora principal, la B.O.D., resultando este proceso en la BOD2, modelo que actualmente fabrica y comercializa COBOD. Cada BOD2 consiste en

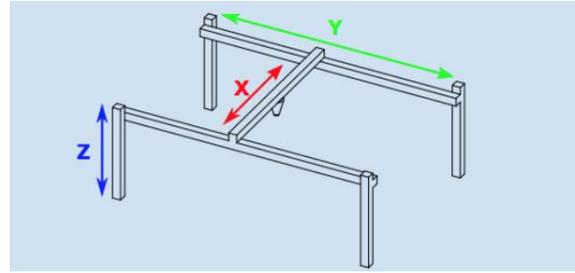


Imagen 35. Sistema X,Y,Z. COBOD. 2017

un sistema cartesiano X, Y, Z dividido en varios módulos de 2.5m cada uno, capaces de ser ensamblados unos con otros en cualquier eje<sup>69</sup>.

El número de módulos requeridos para la fabricación de un proyecto dependerá del tamaño de este. Al tratarse de un sistema modular, es posible que el cliente elija la configuración de la maquinaria que mejor se acomode a su bolsillo y a su proyecto.

El paquete más básico para construir 20m<sup>2</sup> tenía en 2020 un precio en el mercado europeo de 180, 000 euros, que para el presente año 2023 serían 3,708,202.87 pesos mexicanos.

1. 1 cabeza extrusora personalizable
2. 1 riel de transporte horizontal de eje X
3. 2 rieles de transporte horizontal de eje Y
4. 4 rieles de transporte vertical de eje Z

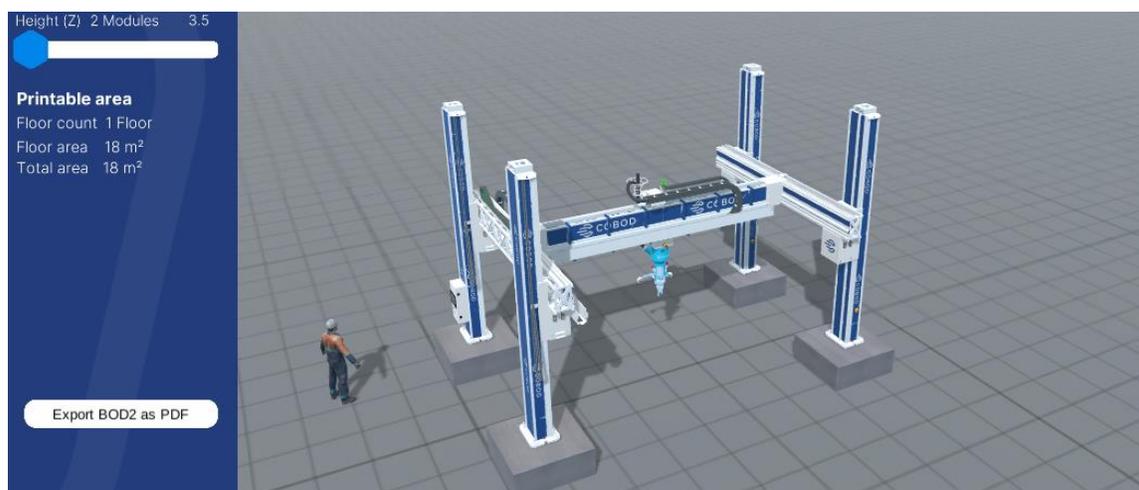


Imagen 36. Sistema de impresión COBOD de 18m<sup>2</sup> de área de impresión. COBOD. 2020

<sup>69</sup> “La impresora 3D de construcción BOD2 | COBOD International”, COBOD, consultado el 4 de enero de 2023, <https://cobod.com/es/productos/bod2/>.

## Arquitectura Impresa en 3D: New Story.

New Story es una organización sin fines de lucro basada en San Francisco y Atlanta, con planes de expansión a corto plazo a la Ciudad de México. Su equipo trabaja de la mano con organizaciones locales alrededor del mundo con el fin de construir comunidades funcionales y sanas, enfocando sus esfuerzos en dar solución a la escasez global de vivienda<sup>70</sup>.

En su constante búsqueda de mejores y más eficientes sistemas constructivos, New Story optó por la integración de tecnología de Impresión Tridimensional en su metodología de trabajo, resultando en un proceso constructivo más costo eficiente y de mejor calidad que el estándar actual de vivienda social<sup>71</sup>.

New Story ha construido más de 2, 300 viviendas en 26 comunidades a través de países como Haití, El Salvador, Bolivia y México, además de haber creado software de código abierto compartido con más de 25 organizaciones en 4 continentes y haber desarrollado el primer proyecto de comunidad impresa en 3D en América Latina<sup>72</sup>

Gracias a una serie de donaciones, el apoyo de la empresa ICON <sup>73</sup> y la organización mexicana Échale<sup>74</sup>, se hizo posible el desarrollo en diciembre de 2019, de la primera comunidad impresa en 3D en Tabasco, México, que albergará a 50 familias en situación de pobreza extrema.

Las casas impresas cuentan con dos dormitorios, una sala de estar, cocina y baño. Al haber sido co-diseñadas con las familias que las habitarán, estas cumplen con lo necesario para satisfacer las necesidades específicas de la comunidad.

---

70 "New Story - We Pioneer Solutions to End Homelessness | Home", New Story, consultado el 5 de enero de 2023, <https://newstorycharity.org/>.

71 "3D Community", New Story, consultado el 5 de enero de 2023, <https://newstorycharity.org/3d-community/>.

72 "3D Community".

73 "3D Technology", ICON, consultado el 5 de enero de 2023, <https://www.iconbuild.com/>.

74 mkt, "ÉCHALE", ÉCHALE (blog), consultado el 5 de enero de 2023, <https://echale.mx/>.



Imagen 37. *Casa Impresa en 3D en Tabasco, México.* New Story. 2019

Las familias integrantes de esta comunidad fueron preseleccionadas y se les permitirá mudarse cuando el proyecto sea completado. Cabe mencionar que el 74% de las familias encuestadas durante el proyecto aseguraron que no se sienten seguras bajo sus condiciones de vida actuales y que esto afecta en gran medida su calidad de vida; en esta comunidad, en el año 2019, el ingreso familiar promedio por mes era de aproximadamente 1,600 pesos mexicanos, uno de los ingresos más bajos de todo México.

New Story se asoció el gobierno local para encuestar a más de 500 familias en el área. Las familias seleccionadas para esta comunidad son las 50 familias con mayor necesidad económica y que además pertenecen a una población indígena que ha quedado sin el apoyo de programas gubernamentales.

## Arquitectura Impresa en 3D: Saudi Vision 2030.

La impresión tridimensional será una de las tecnologías utilizadas para transformar el sector de la construcción del Reino de Arabia Saudita.

Según el plan de reforma Saudi Arabia's Vision 2030<sup>75</sup>, la nación buscará incrementar el índice de propiedad de vivienda de sus habitantes mientras fomenta la creación de nuevos empleos de alta especialidad haciendo uso de nuevas tecnologías que promuevan la digitalización de la sociedad saudí. La meta buscará ser alcanzada para el año 2030 y se apoyará, de entre otras, en la Iniciativa de Estímulos para las Tecnologías Constructivas (Building Technology Stimulus Initiative), como parte del Programa Nacional para el Desarrollo Industrial y de Logísticas (National Industrial Development & Logistics Program).

El sector de la construcción del Reino de Arabia Saudita ha experimentado un cambio sustancial en las últimas décadas, ya que las estructuras arquitectónicas modernas fabricadas en concreto y otros materiales reemplazaron los métodos de construcción tradicionales <sup>76</sup>. Si bien el desarrollo económico ayudó a apoyar y reactivar el sector, en la actualidad, el sector de la construcción en el Reino se enfrenta a nuevos desafíos, principalmente la demanda de edificios inteligentes, de bajo costo y mínimo impacto ambiental, lo que requiere de la adopción y desarrollo de tecnologías que apoyen en la reducción del consumo de energético y de recursos naturales, que los lleven a cumplir con el concepto de edificios sostenibles y respetuosos del medio ambiente.



Imagen 38. *Saudi Vision 2030*. Gobierno de Arabia Saudita. 2016

---

<sup>75</sup> "A Sustainable Saudi Vision - Vision 2030", consultado el 5 de enero de 2023, <https://www.vision2030.gov.sa/v2030/a-sustainable-saudi-vision/>.

<sup>76</sup> "A Sustainable Saudi Vision - Vision 2030".



## CAPÍTULO 2

# DESARROLLO DE LA PROPUESTA

## Arquitectura Impresa en 3D: El Concepto

Ahora que se han sentado las bases teóricas de la investigación, es hora de poner manos a la obra y comenzar el diseño de nuestro Sistema de Impresión. Para lograrlo debemos ser capaces de comprender los procesos mecánicos involucrados en el concepto de Imprimir Arquitectura.

En su generalidad, el proceso mecánico es el siguiente:

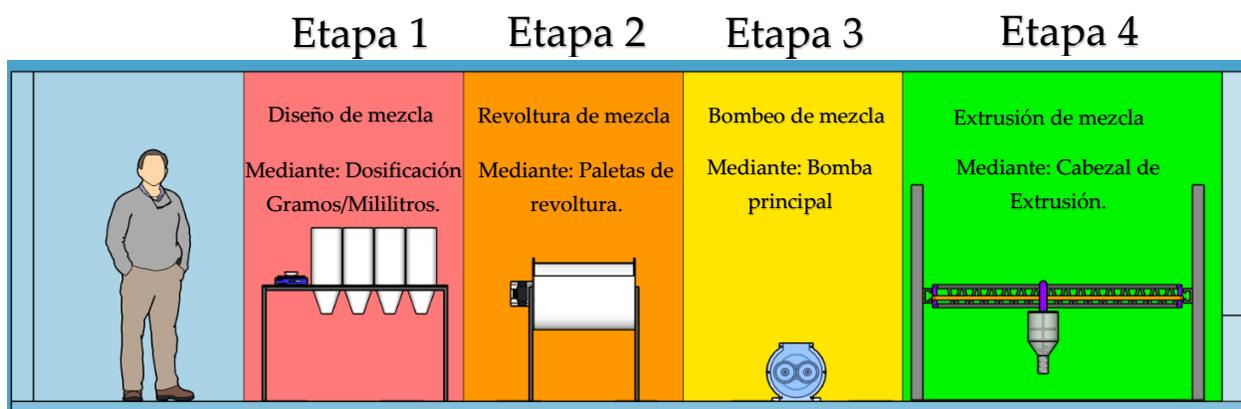


Imagen 40. Proceso mecánico de la extrusión de materiales. Esteban Pérez de León. 2022

La Etapa 1 da inicio al proceso mecánico, determinando (a través de un estudio integral de necesidades físicas y químicas) qué tipo de materiales serán utilizados en la extrusión final.

La Etapa 2 consiste en revolver los materiales seleccionados hasta conseguir una mezcla homogénea que pueda ser bombeada en la siguiente etapa. Más detalles sobre las características de una mezcla para extrusión más adelante.

La Etapa 3 funciona como un puente entre nuestro proceso de diseño de mezcla y nuestro proceso de extrusión. Una bomba es utilizada para trasladar el material diseñado al Cabezal de Extrusión.

La Etapa 4 es la encargada de: *“Depositar, mediante un proceso de extrusión, la mezcla de material previamente diseñada, de manera inteligente, sobre una superficie determinada”*.

Este es nuestro *concepto*, y es aquí en donde hardware, software, diseño industrial y arquitectura unen fuerzas para desarrollar elementos tridimensionales útiles para la construcción.

Es relativamente sencillo conseguir maquinaria como bombas y revolvedoras de material, o llevar a cabo estudios en diseño de mezclas. Pero no resulta tan sencillo adquirir una máquina que convierta Arquitectura Digital en Arquitectura física con el *“clic”* de un botón. Y bien, ya que buscamos resolver ese problema, a partir de este momento esta tesis se enfocará en resolver la Etapa 4 de nuestro proceso; la extrusión de materiales de manera controlada.

Extruir materiales en ambientes controlados para llevar a cabo pruebas de laboratorio ya es una realidad, sin embargo, extruirlos directamente en el sitio de construcción implica pensar en *“La Gran Escala Arquitectónica”*, es por eso por lo que se hace necesario identificar los componentes presentes en el proceso de extrusión, más adelante comprenderemos su correlación como variables.

**Los componentes básicos del proceso de extrusión a gran escala son:**

1. Cuerpo de contención/cabezal de extrusión – Contiene el material.
2. Sistema de revoltura del cuerpo de contención – Revuelve el material.
3. Sistema de extrusión del cuerpo de contención – Extruye material.
4. Boquilla de extrusión del cuerpo de contención – Por donde fluye el material.
5. Sistema de posicionamiento del cuerpo de contención – Traslada el cuerpo de contención a través de un espacio determinado.
6. Dosificación de aditivos al interior del cuerpo de contención – opcional/línea de investigación derivada

Los componentes enlistados interactuarán entre sí para desarrollar la variable dependiente más importante del sistema...nuestra tan adorada Extrusión Lineal Ideal. Antes de continuar quisiera hacer una breve pausa para explicar el punto 6: “Dosificación de Aditivos al interior del cuerpo de contención”, con el fin de brindar una mejor perspectiva del tema.

Ahora que sabemos cuáles son los elementos principales del proceso de extrusión, debemos pensar en cómo estos afectan a la Arquitectura y a su escala. Buscaré ilustrar esta idea con el siguiente texto:

*“Un diseño arquitectónico implica una trayectoria de impresión. Una trayectoria de impresión implica un flujo de material en determinado tiempo. Para una construcción, cada mezcla se diseña con fines y medios específicos que como constructores podemos modificar a nuestra conveniencia. Al tratarse de un sistema de superposición de capas, el tiempo transcurrido entre la extrusión de una capa y la siguiente se relaciona directamente con la complejidad del diseño a completar. Si el tiempo entre capa y capa excede el tiempo de frescura de un material, es muy probable que se haga presente el efecto de “junta fría”<sup>77</sup>”.*

Ahora, ejemplifiquemos de manera gráfica:

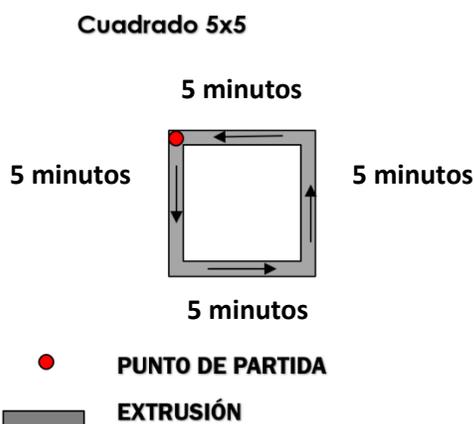


Imagen 41. Extrusión 5x5. Esteban Pérez de León. 2022

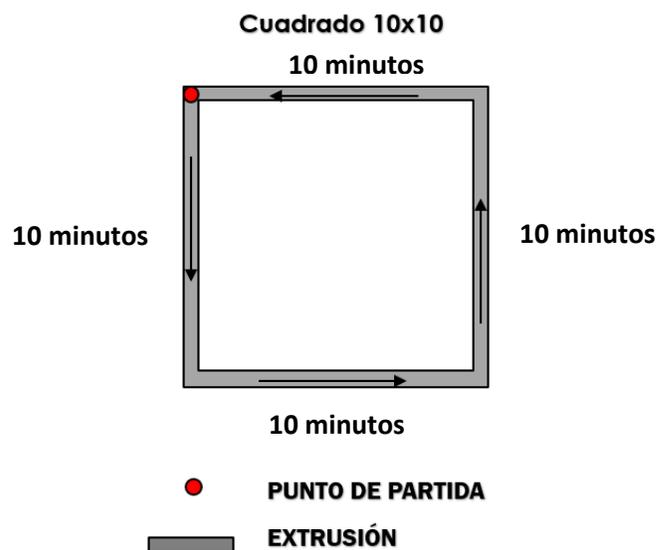


Imagen 42. Extrusión 10x10. Esteban Pérez de León. 2022

77 Venkatesh Naidu Nerella y Viktor Mechtcherine, “Studying the Printability of Fresh Concrete for Formwork-Free Concrete Onsite 3D Printing Technology (CONPrint3D)”, en 3D Concrete Printing Technology (Elsevier, 2019), 333–47, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815481-6.00016-6>.

Tomemos como ejemplo estos dos cuadrados de 5 x 5 m y 10 x 10 m, respectivamente. Ahora imaginemos que cada uno representa una planta arquitectónica muy sencilla. Los lados de la planta de 5 x 5 m tardan en imprimirse 5 minutos cada uno mientras que los lados de la planta de 10 x 10 m tardan 10 minutos cada uno. Es aquí cuando podemos comenzar a ver cómo es que algunas de nuestras variables comienzan a relacionarse. Podemos decir que la velocidad de impresión es de 1 m por minuto en ambos casos.

El tiempo total de impresión de la primera capa extruida para el caso de la planta de 5 m x 5 m sería de 20 minutos, mientras que el tiempo de impresión para la segunda capa sería de 40 minutos en total. Hasta ahora todo va bien, ¿cierto? Los números cuadran y parece existir una lógica en la cual los tiempos de impresión se relacionan con el tamaño de la impresión. A esto me refería con las relaciones directas entre la complejidad del diseño arquitectónico y su tiempo de impresión, lo que deriva, hasta cierto punto, en un problema.

*“La extrusión se lleva a cabo con un material y los materiales constructivos no son materia inerte. Sus propiedades y características pueden cambiar a lo largo del tiempo”.*

Ejemplifiquemos gráficamente:



Imagen 43. Relación entre tiempo impresión y trabajabilidad de material. Esteban Pérez de León. 2022

En caso de que el material utilizado para extruir los ejemplos de las plantas arquitectónicas de 5mx5m y 10mx10m fuese el mismo, la adhesión entre esta primera capa y las capas siguientes variaría dada la frescura del material al concluir los 20 y 40 minutos de impresión respectivamente. Lo cual nos lleva a plantear la siguiente pregunta:

*¿Es posible mejorar el proceso de extrusión de un material y su comportamiento “post extrusión”, a través de un proceso automatizado de dosificación de aditivos dentro de un cabezal extrusor?*

Hipótesis: “Si se dosifican agregados líquidos en cantidades controladas, a una mezcla base de material para extrusión en un determinado periodo de tiempo, dentro de un cabezal extrusor, el comportamiento de la mezcla extruida podrá ser programado y optimizado por el usuario en su beneficio”.

Esta pregunta de investigación, así como su hipótesis son planteadas como una posible línea de investigación derivada de la presente investigación, al introducirse como una variable que tiene la capacidad de mejorar el proceso de extrusión. Tomando en cuenta lo anterior, podemos elaborar un nuevo diagrama:

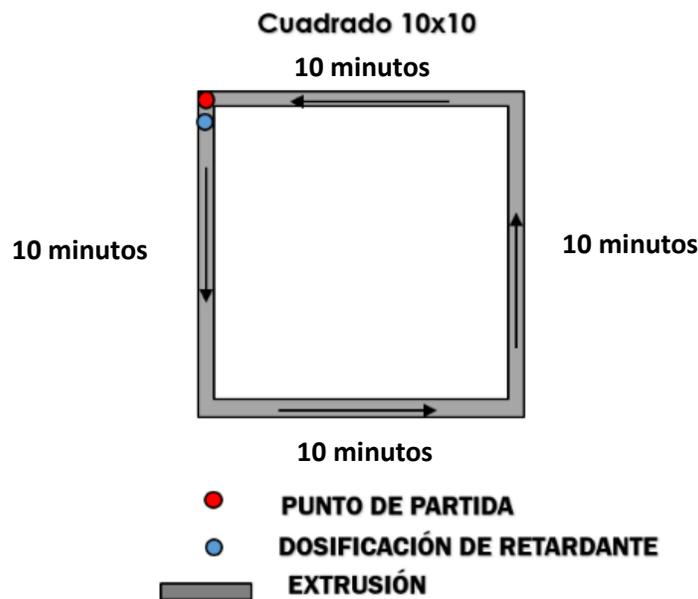


Imagen 44. Extrusión con agregados. Esteban Pérez de León. 2022

La nueva variable de dosificación podría integrarse al proceso de diseño de nuestra herramienta. ¿Qué sucede si se le permite al usuario dosificar cantidades exactas de aditivos a su mezcla base? Ejemplificando gráficamente, finalizaríamos con:



Imagen 45. Nueva relación entre tiempo impresión y trabajabilidad de material. Esteban Pérez de León. 2022

Dominar la capacidad de agregar cantidades exactas de agregados o aditivos a una “mezcla base de material” en cualquier momento del proceso de extrusión, abre la posibilidad de personalizar casi cada centímetro cúbico de construcción mediante esta técnica constructiva.

No sólo hablamos de retardar el tiempo de trabajabilidad de un material, podemos también hablar de cambiar sus propiedades físicas para hacerlo por ejemplo más elástico, menos denso, hidrofóbico, antibacteriano, etc. Abriendo las puertas a un sin fin de combinaciones físicas y químicas útiles en el desarrollo de distintos tipos de elementos constructivos.

### **Desarrollo Mecánico.**

Demos inicio al desarrollo de nuestra herramienta, comenzaremos dimensionando el cabezal de extrusión. Se podría pensar que un cabezal extrusor para materiales utilizado en obra debería ser capaz de almacenar “un gran volumen de material” dado que “va a imprimir cosas grandes” A pesar de haber pensado lo mismo en algún punto de mi investigación, me di cuenta de que “un gran volumen de material” contenido en “un gran recipiente” implica... “un gran peso” (además de un gran costo), el cuál debe ser trasladado de un punto a otro por nuestro sistema de posicionamiento.

A mayor peso, mayor energía necesaria para transportarlo, y, además, mayor debe ser la rigidez del sistema de posicionamiento para evitar movimientos indeseados en su estructura, como vibraciones o tambaleos resultantes de la inercia que un cuerpo pesado en constante aceleración y desaceleración pudiese provocar, es decir; adiós E.L.I.

Si bien podríamos extruir material directamente desde un sistema de bombeo, la responsabilidad entera del proceso de extrusión recaería en un solo elemento. Para extruir material sería necesario mantener un bombeo constante y se eliminaría cualquier

posibilidad de dosificación de aditivos, a menos que estos fuesen agregados al inicio de su bombeo, pero en este caso, los aditivos ya serían parte de una mezcla base por lo que no podríamos decir que estamos automatizando el proceso de dosificación y mezcla de aditivos en tiempo real en el momento que la impresión así lo requiera. ¿pero y si se automatiza el proceso de dosificación antes de que el material sea bombeado? Puede ser, pero el problema que esto conlleva es que el material aún tiene un largo tramo que recorrer entre el punto “A” bomba y el punto “B” cabezal extrusor y el tiempo que tardaría en recorrer esta distancia y depositarse en el terreno sería mayor al tiempo que le llevaría a la una mezcla base mezclarse directamente en el tanque y extruirse.

Por ende, para este proyecto se utilizará un contenedor principal buscando de esta manera tener la posibilidad de extruir material independientemente de que la bomba se encuentre en funcionamiento. Esto además de darnos independencia, nos da la oportunidad de preparar pequeños lotes de material para usar como muestras experimentales, pero... ¿qué tamaño de muestras?

### Definiendo el tamaño de la muestra.

Bien, ya sabemos que utilizaremos un contenedor y por qué, ahora debemos identificar su tamaño y geometría. Para eso debemos prestar atención a nuestras necesidades y complementar lo que ya sabemos con un análisis de los análogos existentes alrededor del mundo.

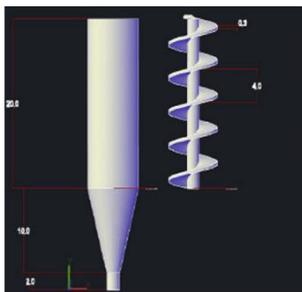


Imagen 46. Sistema de extrusión propuesto por Malaeb et al. Malaeb et al. 2019

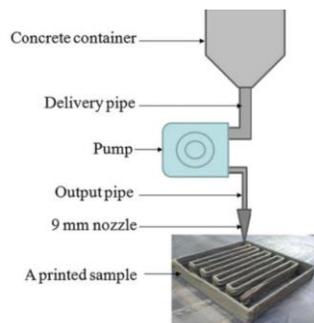


Imagen 47. Sistema de extrusión propuesto por Le et al. Le et al. 2012

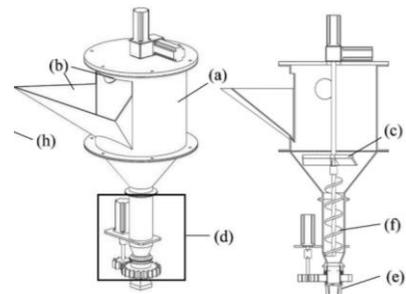


Imagen 48. Sistema de extrusión propuesto por Zou et al. Zou et al. 2020

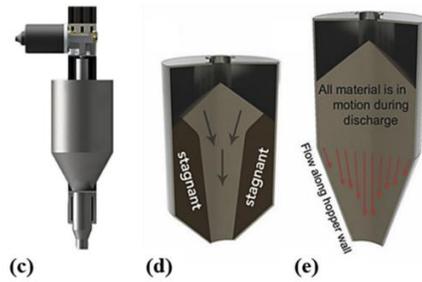


Imagen 49. Sistema de extrusión propuesto por Albar et al. Albar et al. 2020

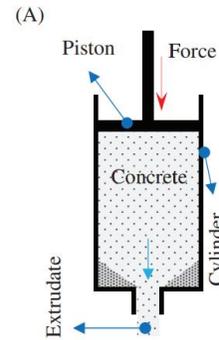


Imagen 50. Sistema de extrusión propuesto por Nerella et al. Nerella et al. 2019

En una investigación libanesa<sup>78</sup> se hace presente un contenedor cilíndrico dotado de un tornillo extrusor del mismo diámetro del cilindro. Cabe mencionar que los autores defienden la idea de que un óptimo diseño de la herramienta para extrusión es necesario para complementar el diseño óptimo de una mezcla base. En esta investigación el bombeo del material hacia el contenedor es manual mientras que la extrusión de este se hace mediante un tornillo de Arquímedes conectado a un motor a pasos. El tornillo genera una presión que empuja al concreto hacia la boquilla<sup>79</sup>.

El tamaño de la boquilla del experimento fue de 2.5 cm en diámetro y para su operación fue montada en una máquina C.N.C. convencional. Datos adicionales de las dimensiones de la máquina son inexistentes, sin embargo, sabemos que su tamaño no excede los 30cm de alto dado que se ha utilizado para pruebas en laboratorio.

Para el caso de Le et al. y su aproximación inglesa<sup>80</sup> en el año 2012 abordaba el tema haciendo uso de una bomba montada directamente sobre el cabezal de extrusión, mientras que, sobre esta, se encontraba situado el contenedor de materiales. Un documento científico de hace 11 años podría parecer no aportar mucho al tema, sin embargo, este autor y sus tempranos descubrimientos son una gran guía para investigaciones más contemporáneas que siguen citando sus descubrimientos para el

78 Zeina Malaeb et al., "3D Concrete Printing: Machine and Mix Design", International Journal of Civil Engineering and Technology 6 (el 1 de junio de 2015): 14–22.

79 Malaeb et al.

80 T. T. Le et al., "Mix Design and Fresh Properties for High-Performance Printing Concrete", Materials and Structures 45, núm. 8 (agosto de 2012): 1221–32, <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9828-z>.

desarrollo de nuevos procesos. Lo que cabe destacar de su acercamiento al tema son sus observaciones en cuanto a la relación existente entre las propiedades físicas del material y su relación con el hardware desarrollado. En cuanto al hardware, sus experimentaciones conllevaron el uso de una boquilla de 9 mm (que llegó a taparse dada la incorporación de fibras de micro polipropileno) de diámetro, que puede resultar un tamaño un tanto pequeño tomando la escala a la que nuestra propuesta tiene como meta. En otras investigaciones, descubrieron cómo es que la propia geometría interna y externa del cabezal puede generar efectos adversos al momento de extruir materiales. Por ejemplo, en un estudio de la Universidad Técnica de Dresden<sup>81</sup>, ilustraron un método de extrusión por pistón dentro de un cabezal rectangular, cuya funcionalidad era casi nula dado que el material empujado podía acumularse en las esquinas internas del elemento. Por otro lado, un grupo de investigadores resididos en Reino Unido<sup>82</sup> solucionaron este problema desarrollando un cabezal cuya geometría además de ser más eficiente en términos de flujo de material, integraba una espátula que permitía despegar remanencias de material adheridas a la superficie interna del cuerpo de contención e integrarlas de nuevo al proceso de extrusión. Ninguna de estas investigaciones abordó el tema del tornillo de extrusión de una manera muy específica, sin embargo, investigadores de la Universidad de Tongji en Shanghai<sup>83</sup> llegaron incluso a teorizar la densidad de bombeo que el tornillo que desarrollaron para su máquina habría de extruir, abordando temas como el calibre del acero que utilizarían para su fabricación, la distancia o paso entre cada cuerda, el diámetro de las espas y hasta el diámetro del eje.

El análisis de diversas fuente e información, como las investigaciones descritas anteriormente nos dotó de suficientes conocimientos para desarrollar nuestra propuesta.

---

81 Nerella y Mechtcherine, "Studying the Printability of Fresh Concrete for Formwork-Free Concrete Onsite 3D Printing Technology (CONPrint3D)".

82 Abdulrahman Albar et al., "Effective Extrusion-Based 3D Printing System Design for Cementitious-Based Materials", Results in Engineering 6 (junio de 2020): 100135, <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2020.100135>.

83 Xiao et al., "3D Recycled Mortar Printing".

Es momento de mencionar que la mayor parte del prototipo será materializado vía impresión tridimensional en plástico PETG. Esto se debe al enfoque replicativo que busco otorgarle a esta herramienta y la nula disponibilidad de otros métodos de fabricación durante la pandemia de Covid 19. Las dimensiones del prototipo y sus componentes son tales que estos puedan ser producidos por cualquier impresora 3D convencional en cualquier parte del planeta. Fabricaremos una máquina de fabricación aditiva utilizando una máquina de fabricación aditiva.

Como vimos anteriormente, las dimensiones y forma de un cabezal de extrusión pueden variar de investigación a investigación. A pesar de esto, notamos que lo mejor es que nuestro contenedor posea la forma de un cilindro con su parte baja en terminación cónica, ya que esto sirve para el flujo del material y su mezcla al interior, como un silo.

Para el desarrollo de este prototipo se propone un contenedor cilíndrico principal de 13.5cm de diámetro exterior por 20 cm de alto. En cuanto al embudo inferior, este se propone con una altura de 10 cm y una reducción a 5 cm en su diámetro interior menor. Esta reducción desemboca en el cilindro secundario, de 13.5 cm de alto que contendrá el tornillo de Arquímedes. Los grosores de las paredes se plantean de 3 mm de espesor. A lo largo de la experimentación se observará qué tanto desgaste puede sufrir producto de la abrasión del material que en su interior sea mezclado.

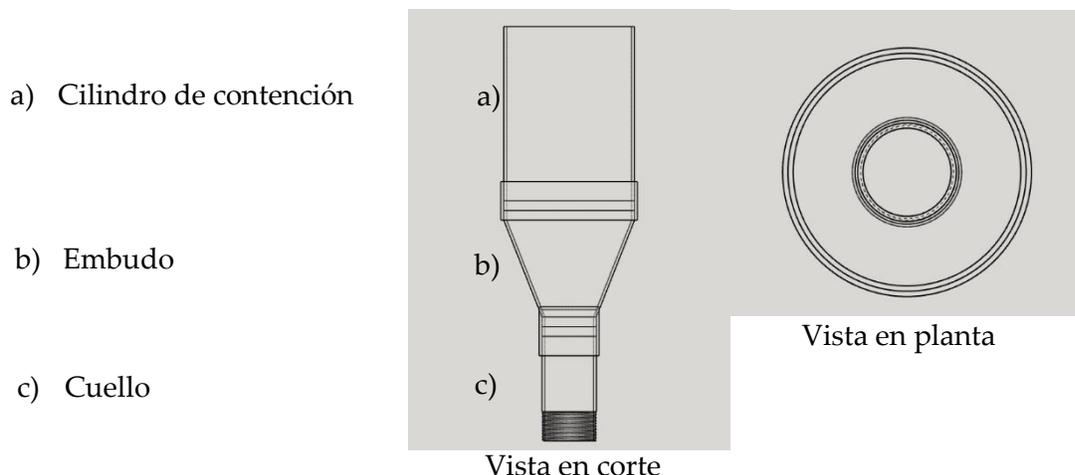


Imagen 51. Componentes generales del cuerpo de contención. Esteban Pérez de León. 2022

Se decidió utilizar estas dimensiones dado que se plantea el uso del cabezal como sistema de revoltura y extrusión sin necesidad de utilizar un bombeo para la extrusión de pequeños lotes de material, necesarios para probar distintas características de las mezclas vertidas en su interior, es decir, se plantea un cabezal experimental en cuyo contenedor se pueda mezclar y extruir material de manera manual. El volumen de contención de esta propuesta es de 3, 417 cm<sup>3</sup>

Lo suficiente para extruir 3 cubos sólidos de 10x10x10 cm para someterlos a distintos tipos de pruebas como la prueba de resistencia a la compresión. El volumen unitario de estos cubos es de 1000 cm<sup>3</sup>. 3 cilindros ocupan un volumen de 3000 cm<sup>3</sup>. Para calcular el volumen total disponible en el contenedor es necesario conocer los volúmenes ocupados por los elementos que se encontrarán en su interior, los cuales desarrollaremos más adelante. Por eso el volumen inicial se encuentra sobrado.

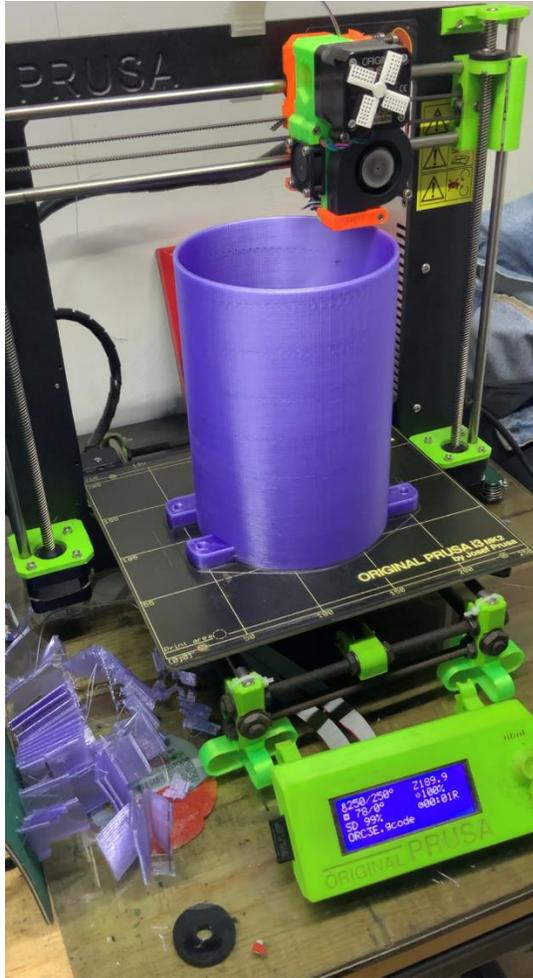
El peso volumétrico máximo del concreto simple y morteros con agregados de peso normal que usaremos es de 2.20 ton/m<sup>3</sup> <sup>84</sup> para calcular el peso máximo del material contenido dentro de nuestro cilindro tomaremos como unidad el peso volumétrico del concreto reforzado, que es de 2.40 ton/m<sup>3</sup>, esto para estar sobrados en cuanto a cálculo y prever pesos agregados.

Tomando en cuenta el peso volumétrico del concreto reforzado es de 2.40 ton/m<sup>3</sup>, y el volumen de material que se encontrará contenido dentro de nuestro cabezal es de 0.0034177 m<sup>3</sup>, podemos saber que su peso máximo contenido será de 8.20 kg gracias a la siguiente fórmula:

$$2.40 \text{ ton/m}^3 \times 0.0034177 \text{ m}^3 = 0.00820248 \text{ ton} = 8.20 \text{ kg}$$

---

84 "772d227d-d168-efc4-a2e3-86ba78c80cb4.pdf", consultado el 10 de enero de 2023, <https://www.cemexmexico.com/documents/27057941/45587277/aplicaciones-manual-construccion-general.pdf/772d227d-d168-efc4-a2e3-86ba78c80cb4>.



Tomar el tiempo necesario para desarrollar un buen modelo por computadora tiene sus beneficios. La paciencia que tengamos al momento de trabajar se verá reflejada como un mínimo o nulo porcentaje de errores en nuestro diseño, y por ende en nuestra fabricación.

El cabezal se divide en 5 piezas ensamblables entre sí. Cada pieza llevó un tiempo distinto de impresión, por ejemplo, el cilindro principal se imprimió en un total de 12.48 h. El promedio del tiempo de impresión para los otros 4 componentes fue de aproximadamente 11 h es decir que la fabricación del cuerpo de contención llevó un total de 50 h de impresión aproximadamente.

Imagen 52. Cilindro de contención recién impreso. Esteban Pérez de León. 2022

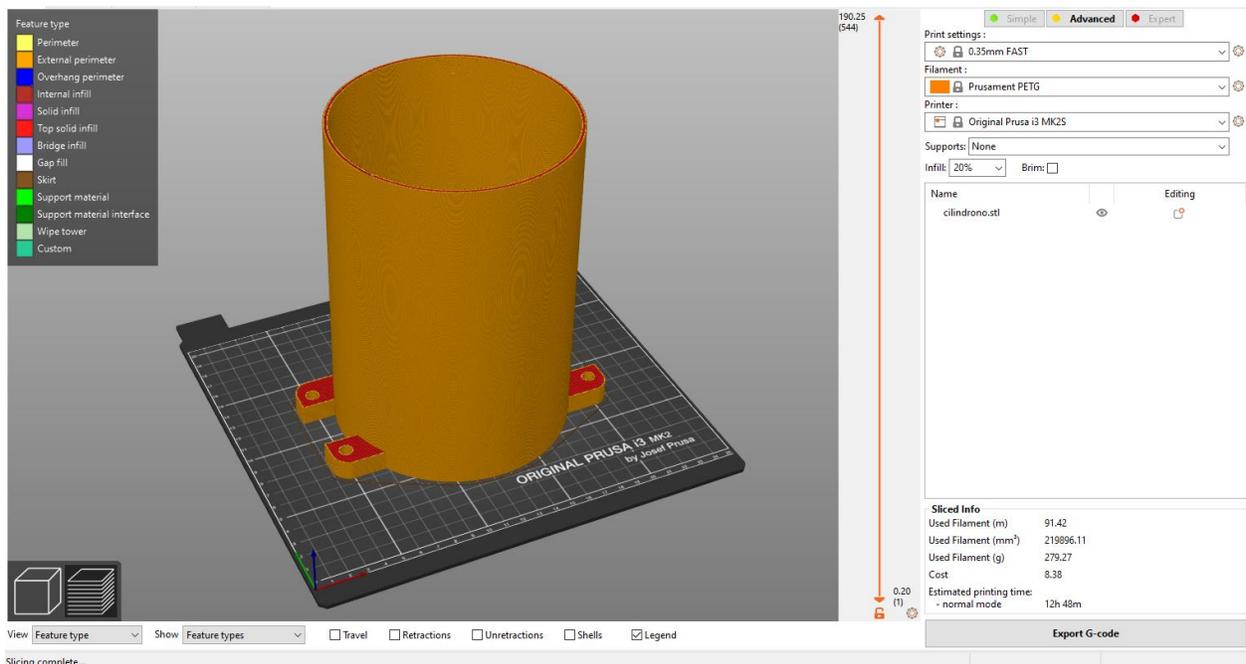


Imagen 53. Cilindro de contención en preimpresión, software Slic3r. Esteban Pérez de León. 2022



Imagen 54. Componentes impresos del Cuerpo de contención. Esteban Pérez de León. 2022

En la imagen superior podemos observar, de izquierda a derecha, los 5 componentes básicos de nuestro cuerpo de contención: Tapa, embudo-cuello-boquilla y cilindro de contención. El correcto ensamble de estos componentes ha sido puesto a prueba, todas las piezas empataron unas con otras, excepto la “rosca interior” de nuestra boquilla de extrusión. Cometí el error de hacerle una rosca izquierda en lugar de una rosca derecha. Una vez que este error se corrigió se llevaron a cabo pruebas de contención de líquidos. El cabezal es 100% impermeable. Habiendo comprobado la funcionalidad y replicabilidad de estos componentes como piezas individuales, atenderemos el siguiente punto sin inconvenientes.

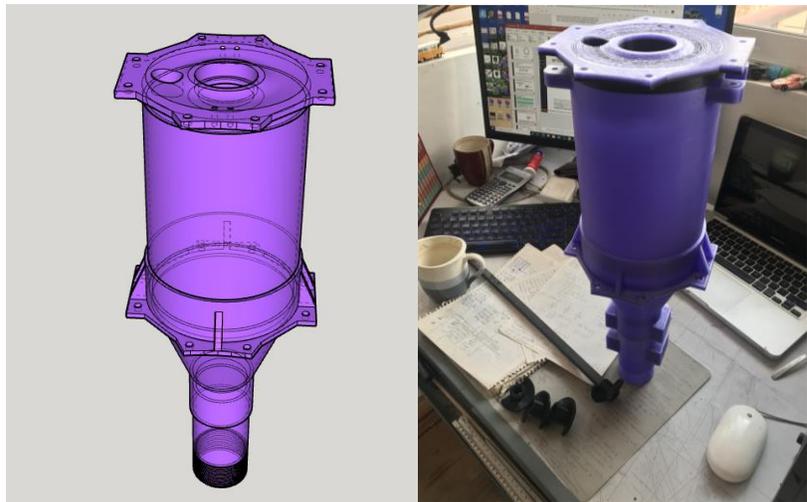


Imagen 55. Cuerpo de contención, del software a la realidad. Esteban Pérez de León. 2022



Imagen 56. Ensamble. Esteban Pérez de León. 2022



Imagen 57. Ensamble2. Esteban Pérez de León. 2022



Imagen 58. Ensamble3. Esteban Pérez de León. 2022

En esta etapa de desarrollo del cabezal de extrusión se diseñó y fabricó la estructura encargada de “sostener y proteger” todos los elementos que conformarán a la herramienta. Fabricada en PETG y MDF de 12mm de espesor, se busca, además de ligereza, lograr una económica replicabilidad y reparabilidad. Esta portará lo siguiente:

1. Elementos electrónicos: 7 motores a pasos y su respectivo cableado.
2. El sistema de extrusión: eje, poleas, banda de transmisión, paletas de revoltura, tornillos de extrusión.
3. Cuerpo de contención: Tapa, embudo, cuello, boquilla.
4. Adicionales: 4 Bombas peristálticas y 4 tanques para dosificación de agregados.
5. Sistema de posicionamiento: Rodamientos de desplazamiento.

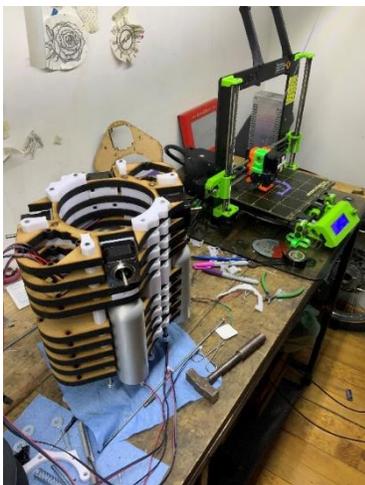


Imagen 59. Ensamble4. Esteban Pérez de León. 2022

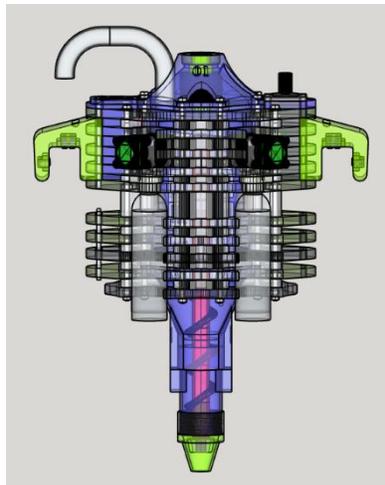


Imagen 60. Objetivo3D. Esteban Pérez de León. 2022



Imagen 61. Ensamble5. Esteban Pérez de León. 2022



Imagen 62. Paletas. Esteban Pérez de León, 2022



Imagen 63. El eje principal. Esteban Pérez de León, 2022



Imagen 64. Paletas2. Esteban Pérez de León, 2022

Al interior del cuerpo de contención contamos con un elemento base del proceso de extrusión: El eje principal. Accionado por un motor a pasos, cuenta con suficiente fuerza para revolver la totalidad de la mezcla contenida en su interior. Idealmente el eje debería ser fabricado y maquinado en acero inoxidable, para evitar la corrosión al encontrarse este en contacto con el agua. Por temas económicos se optó por un eje cuadrado de fierro.

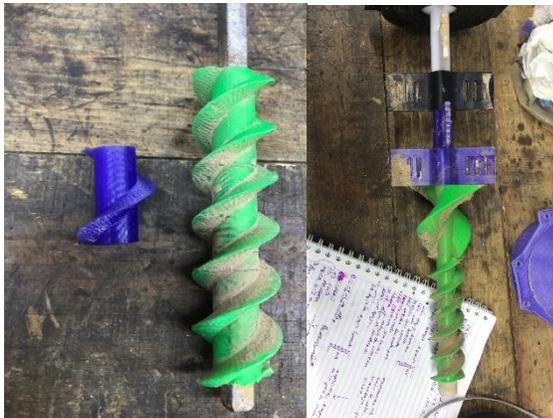


Imagen 65. Eje principal tras experimentación. Esteban Pérez de León, 2022



Imagen 66. Tornillos de extrusión tipo 1 y 2. Esteban Pérez de León, 2022

Como mencionamos anteriormente, el eje principal porta elementos como las paletas de revoltura y los tornillos de extrusión. A lo largo de esta investigación se desarrollaron alrededor de 6 tipos distintos de paletas de revoltura y 2 tipos de tornillos extrusores de diferentes pasos cada uno. Todos estos elementos fueron sometidos a pruebas de funcionamiento dentro del sistema. Los elementos escogidos para la experimentación fueron aquellos que no reventaron bajo el estrés de su funcionamiento.



Imagen 67. Soldando. Esteban Pérez de León. 2022



Imagen 68. Personalizando. Esteban Pérez de León. 2022



Imagen 69. Riel de experimentación. Esteban Pérez de León. 2022

Para el desarrollo del riel de desplazamiento fueron utilizados perfiles rectangulares de acero. El despiece de dicho componente fue de 2 perfiles de 3 m de largo que fueron recortados para fabricar la unión entre ambos rieles en ambos cerramientos del rectángulo, esto con el objetivo de utilizar un solo tramo de material de 6 m y economizar costos. Dado que la cremallera de desplazamiento montada en este componente es modular, el sistema puede escalarse hasta un largo de 6 m. Para trabajar con claros más largos se haría necesario utilizar un armado para evitar la flexión en la estructura.

Ahora tenemos una herramienta cuyas características son:

- Volumen de almacenamiento de 3000 cm<sup>3</sup>.
- Torque sostenido de 3 n/m con relación de poleas de extrusión de 1:1.
- Torque sostenido de 9 n/m con relación de poleas de extrusión de 1:3.
- 4 contenedores para aditivos de 260 ml c/u.
- Paleta de revoltura para bajas velocidades.
- Tornillo extrusor de paso de 20 mm
- Boquilla de extrusión de 30 mm
- Tamaño máximo de agregados en mezcla: 3 mm (con esta configuración).
- Hardware abierto (para personalización, reparaciones y mejoras).
- Riel de desplazamiento de tracción modular de 2.60 m de largo (escalable).



Imagen 70. *El ensamble final.* Esteban Pérez de León, 2022

### Hardware y software de control.

Si bien se ha desarrollado un elemento mecánicamente funcional, este no podría ser puesto a prueba sin su respectivo hardware y software de control. Para lograr controlar el equipo se utilizó un conjunto de elementos electrónicos montados sobre un tablero de control, que fueron programados



Imagen 71. Tablero de control. Esteban Pérez de León. 2022

específicamente para las labores de extrusión y desplazamiento del cabezal extrusor. Una vez programados, dichos componentes fueron ligados a una interfaz gráfica, encargada de facilitar la interacción humano - computadora. La conformación del sistema de control es la siguiente:

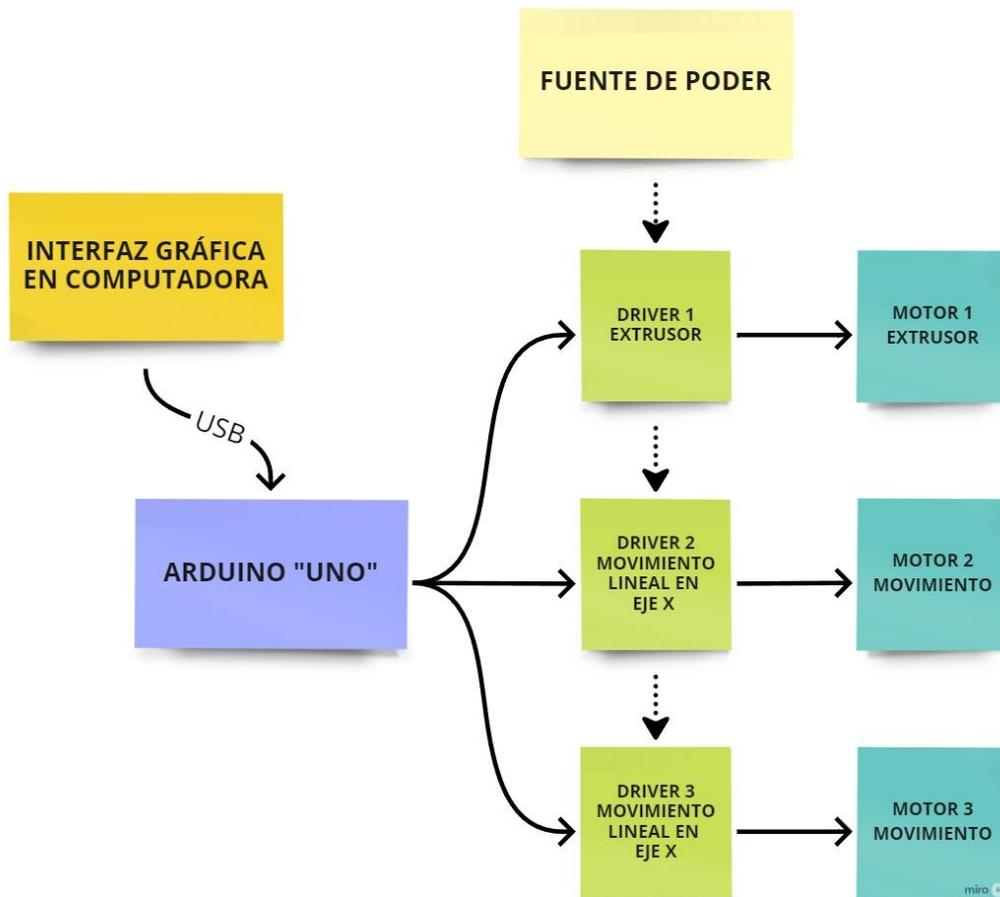


Imagen 72. Diagrama de flujo del sistema de control. Esteban Pérez de León. 2022

Como controlador principal, se hizo uso de una tarjeta microcontroladora Arduino "UNO" de licencia abierta, esto quiere decir que tanto códigos como archivos pueden ser modificados libremente ya que son de acceso público. El uso de este elemento se determinó dado que permite desarrollar prototipos sin requerir conocimiento especializado en el área de la programación, además de que su costo es accesible. La Arduino "UNO" cuenta con periféricos de entrada y de salida, es decir, recibe y emite "información" de y hacia el exterior, por ejemplo, un sensor de movimiento debe estar conectado a un periférico de entrada para recibir una señal de movimiento, por otro lado, un motor o algún otro actuador debe estar conectado a un periférico de salida, que emitirá una orden, o señal de actuación. Esta tarjeta fue programada para poder comunicarse con los motores mediante comunicación serial, es decir, enviando datos un bit a la vez, de forma secuencial a través de un canal de comunicación. De esta manera es posible modificar la velocidad de respuesta y la cantidad de grados que el eje del motor rotará para ejecutar las tareas seleccionadas.

Existen en el mercado muchas otras formas de controlar actuadores, como por ejemplo tarjetas especializadas para control de ejes X, Y y Z, como las utilizadas para los "CNC's" o las máquinas de corte láser convencionales, sin embargo, el costo de estas tarjetas aumenta considerablemente.

Para el control de los motores se utilizaron elementos llamados "Drivers", que además de proteger a la tarjeta Arduino, se encargan de generar las señales de potencia que permiten activar su función. Es importante mencionar que se necesita de un Driver por motor, y que cada uno de estos debe ser energizado lo suficiente mediante una fuente de poder para el correcto funcionamiento de los motores. En este caso, los motores utilizados fueron nema 23 a pasos, de 1.9 N/m y 3 N/m utilizados tanto para extrusión como para movimiento del cabezal.

Los motores a pasos convierten los impulsos eléctricos enviados por la tarjeta controladora a desplazamiento en grados, lo que deriva en movimientos precisos y repetitivos que además pueden ser personalizados a través de sus respectivos Drivers.

Para desarrollar la interfaz gráfica se utilizó “Python”, un lenguaje de programación de alto nivel que contiene paquetes para interfaz gráfica y protocolo serial que le permiten comunicarse con el Arduino “UNO”. De esta manera, acciones como las rotaciones de un motor pueden traducirse a términos más generosos como “avanzar” o “retroceder”. En la imagen 73 podemos observar 3 acciones distintas: “cabezal extrusor”, “movimiento lineal” e “imprimir”. Las rotaciones de motor de cada una de estas operaciones son traducidas a través de nuestra máquina como centímetros desplazados o gramos de material extruidos. El desarrollo de la interfaz es esencial para el proyecto, ya que con esta se facilitará la caracterización del sistema a través de la correlación de variables presentes en el experimento, tema que se presentará a continuación.

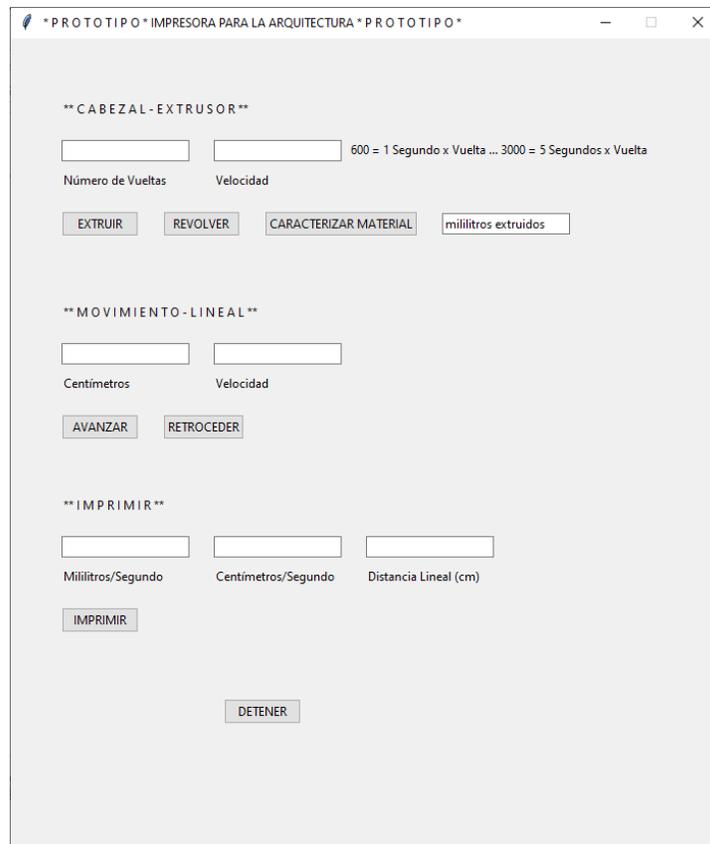


Imagen 73. Interfaz del equipo. Esteban Pérez de León. 2022

## Diseño del experimento

El objetivo de la siguiente experimentación es validar el funcionamiento del sistema desarrollado. Si bien los componentes mecánicos que le conforman han sido probados individualmente, no es posible afirmar que el sistema funciona hasta obtener una “Extrusión Lineal Ideal” Para obtener una E.L.I. debemos experimentar con las siguientes variables independientes y sus subproductos:

1. Velocidad de extrusión. (Vel.E.)
2. Velocidad de desplazamiento del cabezal de extrusión. (Vel.D.)
3. Diámetro de boquilla de extrusión. (B)
4. Peralte de capa (P.C.) (distancia entre la boquilla de extrusión y el suelo o una capa previa).

La experimentación con las variables enlistadas anteriormente derivará en un nuevo lote de variables que conoceremos como variables dependientes. Se podría decir que se trata de la segunda generación de variables de nuestra experimentación:

Resultado de la interacción entre las variables independientes 1 y 3, surge la variable dependiente:

1. Volumen de material extruido por revolución de eje principal. (Vol.E.)

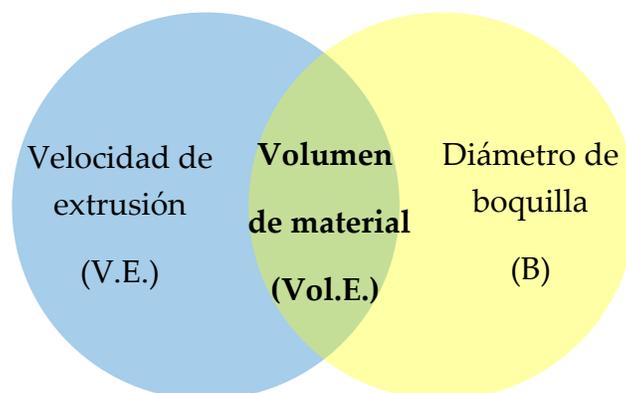


Imagen 74. Obteniendo variable de Volumen de material. Esteban Pérez de León. 2022

Resultado de la interacción entre la variable independiente 2 y la variable dependiente 1, surge la variable dependiente:

### 2. Calidad lineal de extrusión (C.L.E.)

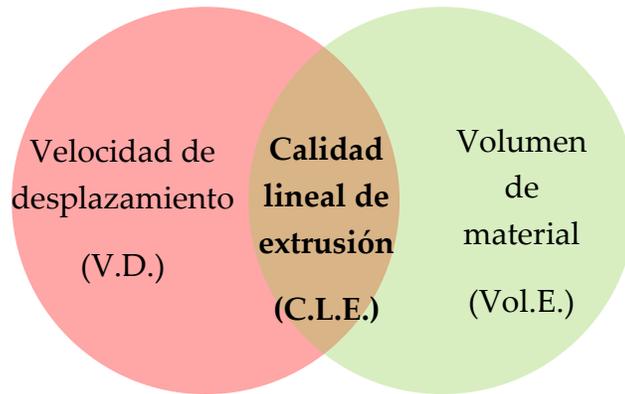


Imagen 75. Obteniendo variable de Calidad lineal de extrusión. Esteban Pérez de León.

Resultado de la interacción entre la variable independiente 4 y la variable dependiente 2, surge la variable dependiente:

### 3. Extrusión Lineal Ideal (E.L.I.)

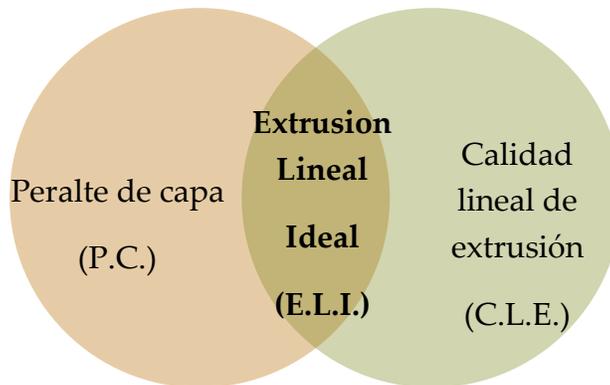


Imagen 76. Obteniendo variable de Extrusión lineal ideal. Esteban Pérez de León. 2022

Por ende, como hipótesis de esta experimentación, tenemos:

“Es posible lograr una extrusión lineal ideal (variable dependiente) a través de la manipulación de las funciones mecánicas (variables independientes) de: velocidad de extrusión, velocidad de desplazamiento de cabezal, diámetro de boquilla y peralte de capa, presentes en el sistema desarrollado”.

## **La interacción entre variables como base del experimento.**

### Variable independiente #1: Velocidad de extrusión (Vel.E.).

Se experimentará con 3 velocidades de extrusión distintas, determinadas por el número de revoluciones que el eje principal complete en determinado tiempo. En consecuencia, el tornillo extrusor que se encuentra montado en dicho eje expulsará distintos volúmenes de material a través de la boquilla del sistema.

Velocidad de extrusión #1 = 1 revolución cada 1.5 segundos.

Velocidad de extrusión #2 = 1 revolución cada 3 segundos.

Velocidad de extrusión #3 = 1 revolución cada 6 segundos.

*Observaciones en Hardware:* Dado que el eje principal mueve un volumen importante de material a través de sus paletas de revolutura, estas encuentran cierta resistencia al momento de girar. Esta resistencia puede dificultar la rotación del eje si el motor utilizado para su funcionamiento no cuenta con el torque necesario para operar. Como se mencionó en el capítulo 9.1, el sistema desarrollado es capaz de contener y revolver un total de 3000 cm<sup>3</sup> de material en su interior.

### Variable independiente #2: Velocidad de desplazamiento del cabezal (Vel.D.).

Se experimentará con 3 velocidades de desplazamiento determinadas por el número de revoluciones que los motores de desplazamiento den en determinado tiempo. Los motores de desplazamiento tienen montados en su eje engranes dentados o piñones, de 16 dientes cada uno, que se desplazan sobre rieles dentados llamados cremalleras. El sistema fue diseñado para que cada diente equivalga a un centímetro desplazado, es decir, una rotación completa del eje equivale a 16cm de desplazamiento.

Velocidad de desplazamiento #1 = 2 centímetro por segundo.

Velocidad de desplazamiento #2 = 4 centímetros por segundo.

Velocidad de desplazamiento #3 = 8 centímetros por segundo.

*Observaciones en Hardware:* Cabe mencionar que investigadores como el Dr. Khoshnevis<sup>85</sup> el Dr. Sungwoo<sup>86</sup> o Gielian et al <sup>87</sup> mencionan velocidades de desplazamiento de hasta 8 o 10 cm/s para los sistemas de extrusión.

Estas velocidades de desplazamiento resultarían útiles siempre y cuando la velocidad de extrusión y la fluidez del material sean capaces de “mantener el paso” de impresión. Debemos recordar que siempre existirán limitaciones físicas tanto en hardware como en materiales que harán de la extrusión a alta velocidad un proceso “minucioso”.

Para conseguir una explicación más gráfica de nuestro proceso de experimentación, armaremos una tabla a la cual se le irán agregando los datos discutidos poco a poco. Hasta este momento hemos discutido: 3 Velocidades de Extrusión (Vel.E.) distintas, y 3 Velocidades de Desplazamiento (Vel.D.) distintas, lo que nos deja con un total de 9 muestras por estudiar. Por consiguiente, nuestra tabla luce de la siguiente manera:

Muestra	(Vel.E.) (seg./rev.)	(Vel.D.) (cm./seg.)
1	1.5	2
2	3	2
3	6	2
4	1.5	4
5	3	4
6	6	4
7	1.5	8
8	3	8
9	6	8

Tabla 1. *Variables 1-2.* Esteban Pérez de León. 2022

85 Hwang y Khoshnevis, “An Innovative Construction Process-Contour Crafting (CC)”.

86 Sungwoo Lim et al., “Modelling Curved-Layered Printing Paths for Fabricating Large-Scale Construction Components”, *Additive Manufacturing* 12 (octubre de 2016): 216–30, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2016.06.004>.

87 Gieljan Vantghem et al., “3D Printing of a Post-Tensioned Concrete Girder Designed by Topology Optimization”, *Automation in Construction* 112 (abril de 2020): 103084, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103084>.

### Variable independiente #3: Diámetro de boquilla de extrusión (B.)

Se experimentará con una boquilla de extrusión de 3 cm de diámetro. Diversas experimentaciones reportan el uso de diámetros de boquilla que van de 1 hasta 5 cm. Se optó por esta boquilla dada la escala de experimentación ya que se busca obtener resultados lo más cercanos a una operación de campo, fuera de laboratorio. Las formas y dimensiones de las boquillas para extrusión siguen a su función. Agreguemos esta variable a nuestra tabla:

Muestra	(Vel.E.) (seg./rev.)	(Vel.D.) (cm./seg.)	Ancho del cordón con (B) de 30mm (cm.)
1	1.5	2	por definir
2	3	2	por definir
3	6	2	por definir
4	1.5	4	por definir
5	3	4	por definir
6	6	4	por definir
7	1.5	8	por definir
8	3	8	por definir
9	6	8	por definir

Tabla 2. *Variables 1-3*. Esteban Pérez de León. 2022



Imagen 77. *Boquillas de 20 y 30 milímetros*. Esteban Pérez de León. 2022

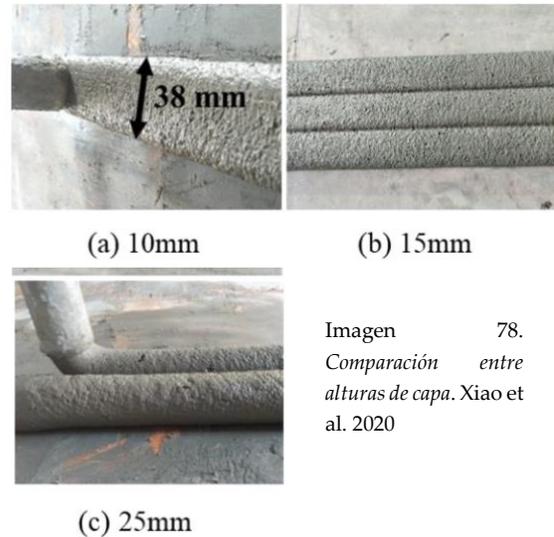
### Variable independiente #4: Peralte de capa (P.C.)

Se experimentará con un peralte de capa de 2 cm de alto, que responde a la distancia entre la boquilla de extrusión y la superficie de impresión. El eje de desplazamiento será fijado a esta altura ya que aún no se cuenta con un eje de desplazamiento en el eje "Z". Es posible fijar el eje de desplazamiento a una altura menor, como por ejemplo a 1 cm de la superficie de impresión, lo cual resultaría en capas más anchas dada la relación de tamaño entre el diámetro de la boquilla y la separación de 1 cm: 3:1, experimentar con una relación 3:2 es lo que haremos. Una impresión relación 3:3 no sería la ideal dado que la extrusión no

tendría la capacidad de comprimirse entre la boquilla de extrusión y la superficie de impresión, como se observa en los resultados presentados en el inciso c) por Xiao et al<sup>88</sup>.

Muestra	(Vel.E.) (seg./rev.)	(Vel.D.) (cm./seg.)	Ancho del cordón con (B) de 30mm (cm.)	(P.C) (cm.)
1	1.5	2	por definir	2
2	3	2	por definir	2
3	6	2	por definir	2
4	1.5	4	por definir	2
5	3	4	por definir	2
6	6	4	por definir	2
7	1.5	8	por definir	2
8	3	8	por definir	2
9	6	8	por definir	2

Tabla 3. Variables 1-2. Esteban Pérez de León. 2022



### Variable dependiente #1: Volumen de material extruido por revolución de eje (Vol.E.)

Resultado de pesar el material extruido a través de un diámetro de boquilla de 3 cm a 3 velocidades de extrusión distintas en segmentos de cordón de 30 cm lineales. En total, las pruebas de velocidad de extrusión arrojarán 3 resultados distintos que corresponderán a 3 volúmenes distintos de nuestro material.

Obtención: El volumen extruido por revolución se puede obtener de dos formas, la primera y más sencilla es pesando el material extruido directamente de la boquilla utilizando una báscula. La segunda consiste en dividir el peso total del cordón extruido entre el número de revoluciones dadas por el eje principal. El número de revoluciones dadas por el eje principal se obtiene al dividir el tiempo que le llevó al cabezal desplazarse 30 cm entre la velocidad de extrusión. Este método se puede utilizar cuando las muestras a caracterizar se encuentran extruidas sobre una superficie y conocemos las velocidades de extrusión y desplazamiento utilizadas, como es nuestro caso.

88 Xiao et al., "3D Recycled Mortar Printing".

Ejemplo:

Velocidad de extrusión = 1.5 segundos por revolución.

Largo del cordón = 30 centímetros.

Peso del cordón = 500 gramos.

Velocidad de desplazamiento = 2 centímetros x segundo.

Número de revoluciones dadas en 30 cm = ?

Volumen extruido por revolución = ?

$$\text{Número de revoluciones dadas} = \frac{\left(\frac{\text{Largo de cordón}}{\text{Velocidad de desplazamiento}}\right)}{\text{Velocidad de Extrusión}}$$

$$\text{Volumen extruido por revolución} = \frac{\text{Peso del cordón}}{\text{Número de revoluciones dadas}}$$

Sustituyendo:

$$\text{Número de revoluciones dadas} = \frac{\left(\frac{30 \text{ cm}}{2 \text{ cm/seg}}\right)}{1.5 \text{ s/rev}} = 10 \text{ rev}$$

$$\text{Volumen extruido por revolución} = \frac{500 \text{ g}}{10 \text{ rev}}$$

$$\text{Volumen extruido por revolución} = 50 \text{ g}$$

Tomando en cuenta la información anterior, ahora nuestra tabla luce de esta manera:

Muestra	(Vel.E.) (seg./rev.)	(Vel.D.) (cm./seg.)	Ancho del cordón con (B) de 30mm (cm.)	(P.C) (cm.)	Peso del cordón en 30cm. (g.)	Revoluciones dadas por cada muestra de 30cm	Variable dependiente #1 Vol.E (g./rev.)
1	1.5	2	por definir	2	por definir	10	por definir
2	3	2	por definir	2	por definir	5	por definir
3	6	2	por definir	2	por definir	2.5	por definir
4	1.5	4	por definir	2	por definir	5	por definir
5	3	4	por definir	2	por definir	2.5	por definir
6	6	4	por definir	2	por definir	1.25	por definir
7	1.5	8	por definir	2	por definir	2.5	por definir
8	3	8	por definir	2	por definir	1.25	por definir
9	6	8	por definir	2	por definir	0.625	por definir

Tabla 4. Variables 1-2. Esteban Pérez de León. 2022

### Variable dependiente #2: Calidad lineal de extrusión (C.E.).

Producto de la velocidad de desplazamiento lineal del cabezal de extrusión y el volumen de material extruido por revolución en un periodo de tiempo. A través de una inspección visual determinaremos si los resultados obtenidos en la experimentación arrojan posibles extrusiones lineales de buena calidad. Sólo a través de la experimentación obtendremos el valor de las incógnitas presentes en nuestra tabla final, estos valores nos ayudarán a caracterizar todo nuestro sistema. Es decir, seremos capaces de conocer con exactitud cómo se relacionan numérica y físicamente cada una de nuestras variables, y de tener suerte, hallaremos la combinación perfecta que nos permita desarrollar la variable dependiente más importante de todas:

### Variable dependiente #3: Extrusión Lineal Ideal (E.L.I.).

Muestra	(Vel.E.) (seg./rev.)	(Vel.D.) (cm./seg.)	Ancho del cordón con (B) de 30mm (cm.)	(P.C) (cm.)	Peso del cordón en 30cm. (g.)	Revoluciones dadas por cada muestra de 30cm	Variable dependiente #1 Vol.E (g./rev.)	Variable dependiente #2 (C.L.E.) Sí-No	Variable dependiente #3 (E.L.I) Sí-No
	1.5	2	por definir	2	por definir	10	por definir	por definir	por definir
	3	2	por definir	2	por definir	5	por definir	por definir	por definir
	6	2	por definir	2	por definir	2.5	por definir	por definir	por definir
	1.5	4	por definir	2	por definir	5	por definir	por definir	por definir
	3	4	por definir	2	por definir	2.5	por definir	por definir	por definir
	6	4	por definir	2	por definir	1.25	por definir	por definir	por definir
	1.5	8	por definir	2	por definir	2.5	por definir	por definir	por definir
	3	8	por definir	2	por definir	1.25	por definir	por definir	por definir
	6	8	por definir	2	por definir	0.625	por definir	por definir	por definir

Tabla 5. Variables. Esteban Pérez de León. 2022

## El material experimental: Mothra 1.

Con el fin de comprobar la funcionalidad del sistema y obtener una “E.L.I.”, se hace necesario desarrollar una mezcla para extrusión que a través de la experimentación también permita caracterizarle, es decir, descubrir qué velocidad de extrusión y desplazamiento son las ideales para dicho material. Recordemos que es necesario caracterizar una mezcla antes de proceder a utilizarla ya que ningún sistema de extrusión se comporta igual dadas las diferencias entre sus componentes mecánicos.

El diseño de la mezcla que se utilizará en las pruebas es producto de la experimentación con distintas dosificaciones de Arcilla, Polvo de Mármol fino, partículas de Mármol finas (hasta 3mm), Fibras de Typha Domingensis y agua. Dicha mezcla, nombrada Mothra1, fue desarrollada a prueba y error, con el apoyo de investigaciones como la del Dr. Albar<sup>89</sup>.

Diversas muestras de 4 capas de altura, de 10cm de largo X 2.5cm de ancho y 1cm de alto por capa de material extruido, fueron sometidas a pruebas de compresión caseras que consistieron en aplicar cada vez más peso sobre ellas hasta que llegaron al fallo.



Imagen 79. Extrusiones experimentales. Esteban Pérez de León. 2022

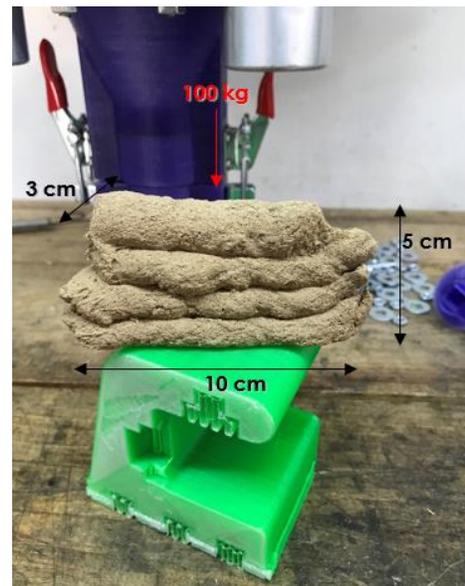


Imagen 80. La mezcla ideal. Esteban Pérez de León. 2022

<sup>89</sup> Albar et al., “Effective Extrusion-Based 3D Printing System Design for Cementitious-Based Materials”.

El análisis de los distintos resultados me llevó a desarrollar una mezcla que arrojó resultados positivos al resistir sin deformación alguna una carga puntual de 100 kg sobre su superficie de 18.75 cm<sup>2</sup> aproximadamente.



Imagen 81. Molienda de arcilla.  
Esteban Pérez de León. 2022



Imagen 82. La mezcla en seco. Esteban Pérez de León. 2022



Imagen 83. Extrusión para pruebas. Esteban Pérez de León. 2022

Dadas ciertas restricciones derivadas de la pandemia por COVID 19 en el año 2021, me fue imposible agregar más peso a mi experimentación, sin embargo, considero estos resultados suficientes para corroborar el funcionamiento de nuestro sistema de extrusión.



Imagen 84. Pruebas de compresión. Esteban Pérez de León. 2022



Imagen 85. Cargando 55 kg. Esteban Pérez de León. 2022



## CAPÍTULO 3

# EXPERIMENTACIÓN

Antes de continuar, quisiera hacer hincapié en la importancia de las imágenes que presentaré a continuación. Es importante que sean analizadas con detenimiento. Estas corresponden a las muestras experimentales 1, 2 y 3 vistas en perspectiva, planta y planta con un escalímetro a su costado como referencia de escala.

Así como presentaré las imágenes de las primeras 3 muestras, también presentaré las de las muestras 4, 5, 6, 7, 8 y 9 junto con sus respectivos resultados.

El siguiente paso consiste en analizar, con base en la información expuesta en este trabajo, cuál, o cuáles de las 9 muestras, parece o parecen ejemplos claros de una Extrusión Lineal Ideal. Más adelante discutiremos cuáles de estas extrusiones y por qué serán consideradas aprobadas.

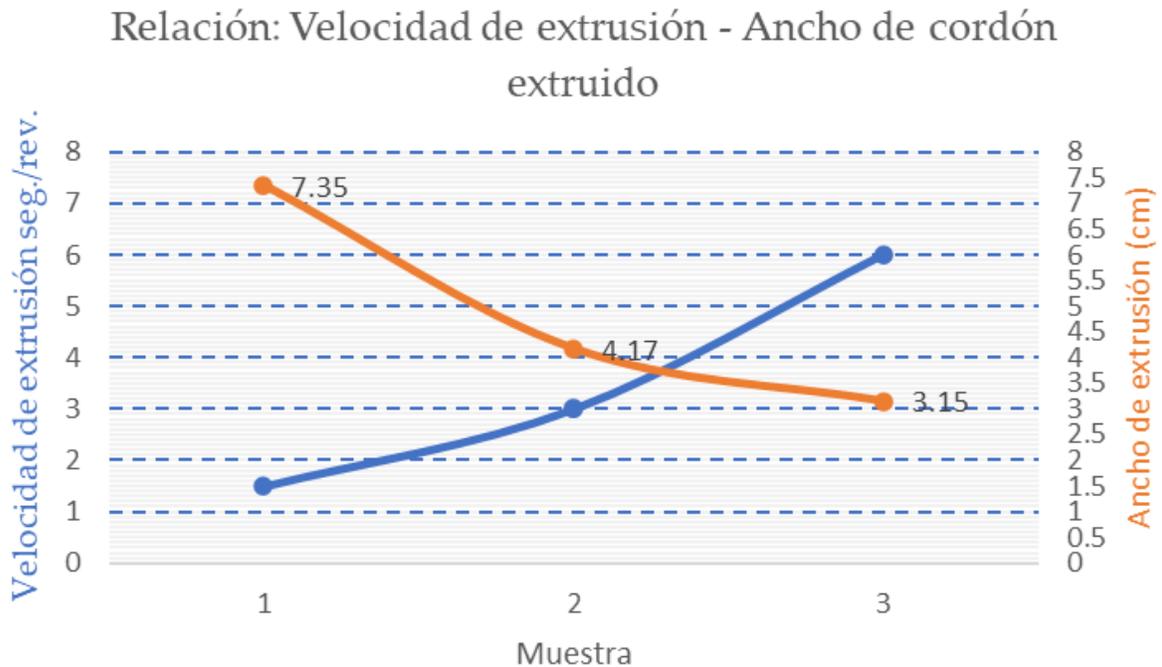
Tabla 6. Reporte fotográfico, muestras 1-3. Esteban Pérez de León. 2022

MUESTRA 1	MUESTRA 2	MUESTRA 3
		
		
		

## Resultados experimentales: Muestras 1, 2 y 3.

Muestra	(Vel.E.) (seg./rev.)	(Vel.D.) (cm./seg.)	Ancho del cordón con (B) de 30mm (cm.)	(P.C) (cm.)	Peso del cordón en 30cm. (g.)	Revoluciones dadas por cada muestra de 30cm	Variable dependiente #1 Vol.E (g./rev.)	Variable dependiente #2 (C.L.E.) Sí-No	Variabe dependiente #3 (E.L.I) Sí-No
1	1.5	2	7.35	2	671	10	67.1	Sí	No
2	3	2	4.17	2	364	5	72.8	Sí	Sí
3	6	2	3.15	2	199	2.5	79.6	No	No

Tabla 7. Resultados experimentales, muestras 1-3. Esteban Pérez de León. 2022



Gráfica 1. Relación Vel.E.-Ancho del cordón m.1-3. Esteban Pérez de León. 2022

La gráfica superior muestra el comportamiento del cordón extruido por nuestro sistema, bajo la interacción entre las variables de Velocidad de desplazamiento = 2 cm/s y Velocidades de extrusión de 1.5, 3 y 6 s/rev. La muestra 1 indica como a mayor velocidad de extrusión, para esta velocidad de desplazamiento, mayor será el ancho del cordón extruido. Sin embargo, la muestra 3 representa cómo a menor velocidad de extrusión para esta velocidad de desplazamiento, el ancho del cordón también será menor. Un balance es hallado en la muestra 2, cuyos nodos se encuentran más cercanos al cruce de las variables. Se podría decir que el balance ideal para esta configuración del sistema sería utilizar una velocidad de extrusión de entre 3.5 y 4 s/rev.

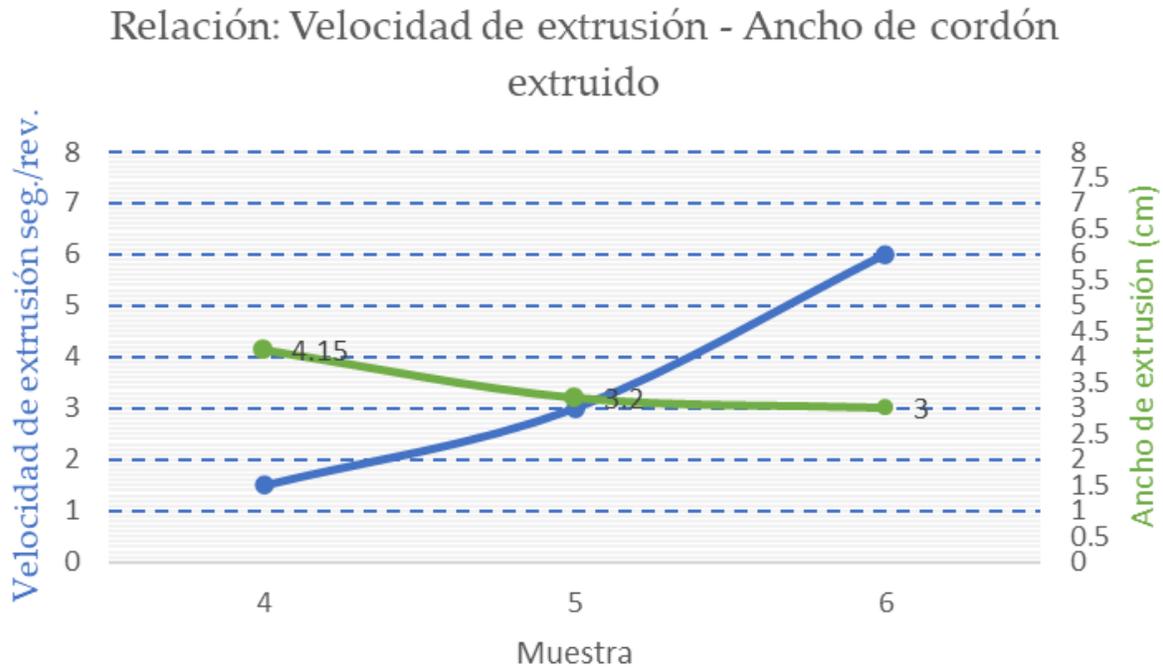
Tabla 8. Reporte fotográfico, muestras 4-6. Esteban Pérez de León. 2022

MUESTRA 4	MUESTRA 5	MUESTRA 6
		
		
		

## Resultados experimentales: Muestras 4, 5 y 6.

Muestra	(Vel.E.) (seg./rev.)	(Vel.D.) (cm./seg.)	Ancho del cordón con (B) de 30mm (cm.)	(P.C) (cm.)	Peso del cordón en 30cm. (g.)	Revoluciones dadas por cada muestra	Variable dependiente #1 Vol.E (g./rev.)	Variable dependiente #2 (C.L.E.) Sí-No	Variabe dependiente #3 (E.L.I) Sí-No
4	1.5	4	4.15	2	364	5	72.8	Sí	Sí
5	3	4	3.2	2	167	2.5	66.8	No	No
6	6	4	3	2	83	1.25	66.4	No	No

Tabla 9. Resultados experimentales, muestras 4-6. Esteban Pérez de León. 2022



Gráfica 2. Relación Vel.E.-Ancho del cordón m.4-6. Esteban Pérez de León. 2022

La gráfica superior muestra el comportamiento del cordón extruido por nuestro sistema, bajo la interacción entre las variables de Velocidad de desplazamiento = 4 cm/s y Velocidades de extrusión de 1.5, 3 y 6 s/rev. La muestra 4 indica como a mayor velocidad de extrusión, para esta velocidad de desplazamiento, mayor será el ancho del cordón extruido, pero curiosamente se acerca a la mitad de los valores obtenidos en la muestra 2. Las muestras 5 y 6 presentan un ancho muy similar al diámetro de la boquilla de extrusión, de 30 mm. La discontinuidad presente en el cordón de la prueba 4 y 6 resultado de esta configuración experimental indican que la Velocidad de Extrusión no se encuentra en equilibrio con la Velocidad de Desplazamiento.

Tabla 10. *Reporte fotográfico, muestras 7-9. Esteban Pérez de León. 2022*

MUESTRA 7	MUESTRA 8	MUESTRA 9
		
		
		

## Resultados experimentales: Muestras 7, 8 y 9.

Muestra	(Vel.E.) (seg./rev.)	(Vel.D.) (cm./seg.)	Ancho del cordón con (B) de 30mm (cm.)	(P.C.) (cm.)	Peso del cordón en 30cm. (g.)	Revoluciones dadas por cada muestra	Variable dependiente #1 Vol.E (g./rev.)	Variable dependiente #2 (C.L.E.) Sí-No	Variabe dependiente #3 (E.L.I) Sí-No
7	1.5	8	3	2	87	2.5	34.8	No	No
8	3	8	3	2	64	1.25	51.2	No	No
9	6	8	3	2	49	0.625	78.4	No	No

Tabla 11. Resultados experimentales, muestras 7-9. Esteban Pérez de León. 2022

### Relación: Velocidad de extrusión - Ancho de cordón extruido



Gráfica 3. Relación Vel.E.-Ancho del cordón m.7-9. Esteban Pérez de León. 2022

Los resultados obtenidos a través de la configuración experimental para las muestras 7, 8 y 9 eran esperados. La muestra 3 dio indicios sobre la necesidad de compensación de velocidad de extrusión para mayores Velocidades de Desplazamiento, datos reafirmados por las pruebas 5 y 7 del lote anterior. Dado que las Velocidades de Extrusión para los experimentos se conservaron iguales, y la variable modificada fue la Velocidad de Desplazamiento, podemos asegurar que existe una clara relación entre la calidad final de un cordón extruido y el balance de las variables que le conforman. Como podemos observar en la gráfica superior, las velocidades de extrusión utilizadas, de 1.5, 3 Y 6 cm/rev no fueron rival para una velocidad de desplazamiento de 8 cm/s.



## CAPÍTULO 4

# ANÁLISIS DE RESULTADOS

## Análisis de resultados: El Producto.

Las extrusiones experimentales consideradas como aprobadas son la muestra 2 y la muestra 4. La muestra 1 podría ser considerada como ejemplo de una Extrusión Lineal Ideal por un ojo inexperto. Sin embargo, podemos notar cómo su ancho duplica el diámetro de la boquilla del cabezal, lo que implica una sobre extrusión<sup>90</sup>. Útil quizás en términos constructivos, más no económicos por el exceso de material utilizado.

Prestemos atención a las siguientes gráficas, los resultados han arrojado datos bastante interesantes:

Muestra	(Vel.E.) (seg./rev.)	(Vel.D.) (cm./seg.)	Ancho del cordón con (B) de 30mm (cm.)	(P.C) (cm.)	Peso del cordón en 30cm. (g.)	Revoluciones dadas por cada muestra de 30cm	Variable dependiente #1 Vol.E (g./rev.)	Variable dependiente #2 (C.L.E.) Sí-No	Variabe dependiente #3 (E.L.I) Sí-No
1	1.5	2	7.35	2	671	10	67.1	Sí	No
2	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>4.17</b>	<b>2</b>	<b>364</b>	<b>5</b>	<b>72.8</b>	<b>Sí</b>	<b>Sí</b>
3	6	2	3.15	2	199	2.5	79.6	No	No

Tabla 12. Datos resaltados de muestra 2. Esteban Pérez de León. 2022

Muestra	(Vel.E.) (seg./rev.)	(Vel.D.) (cm./seg.)	Ancho del cordón con (B) de 30mm (cm.)	(P.C) (cm.)	Peso del cordón en 30cm. (g.)	Revoluciones dadas por cada muestra	Variable dependiente #1 Vol.E (g./rev.)	Variable dependiente #2 (C.L.E.) Sí-No	Variabe dependiente #3 (E.L.I) Sí-No
4	<b>1.5</b>	<b>4</b>	<b>4.15</b>	<b>2</b>	<b>364</b>	<b>5</b>	<b>72.8</b>	<b>Sí</b>	<b>Sí</b>
5	3	4	3.2	2	167	2.5	66.8	No	No
6	6	4	3	2	83	1.25	66.4	No	No

Tabla 13. Datos resaltados de muestra 4. Esteban Pérez de León. 2022

La Velocidad de Extrusión (Vel.E.) de la Muestra 2 es de 3 segundos por revolución, mientras que la de la Muestra 4 es de 1.5 segundos por revolución, sin embargo, el ancho de ambos cordones es casi exacto, igual que el peso de ambos cordones en 30 cm, pero ¿por qué ha sucedido esto?

Si prestamos un poco más de atención, notaremos que el Volumen Extruido (Vol.E) tiene en ambos casos un valor de 72.8 g/rev además de que en ambas muestras los valores para Calidad Lineal de Extrusión (C.L.E.) y Extrusión Lineal Ideal (E.L.I) fueron afirmativos.

<sup>90</sup> Lim et al., "Developments in Construction-Scale Additive Manufacturing Processes".

Estamos hablando de dos extrusiones “exactamente iguales” y la magia detrás de todo esto radica en una variable que no hemos mencionado aun: Velocidad de Desplazamiento (Vel.D.). Nuestra Velocidad de Extrusión (Vel.E). se duplicó pasando de 3 s/rev a 1.5 s/rev Mientras que la Velocidad de Desplazamiento (Vel.D.) lo hizo también, pasando de una velocidad de 2 cm/s A una de 4 cm/s.

Es por esto por lo que nuestras muestras 7, 8 y 9 resultaron un tanto fallidas...

Muestra	(Vel.E.) (seg./rev.)	(Vel.D.) (cm./seg.)	Ancho del cordón con (B) de 30mm (cm.)	(P.C) (cm.)	Peso del cordón en 30cm. (g.)	Revoluciones dadas por cada muestra	Variable dependiente #1 Vol.E (g./rev.)	Variable dependiente #2 (C.L.E.) Sí-No	Variabe dependiente #3 (E.L.I) Sí-No
7	1.5	8	3	2	87	2.5	34.8	No	No
8	3	8	3	2	64	1.25	51.2	No	No
9	6	8	3	2	49	0.625	78.4	No	No

Tabla 14. Fallos en muestras 7,8 y 9. Esteban Pérez de León. 2022

La Velocidad de Extrusión (Vel.E.) de 1.5 s/rev para estas muestras no fue suficiente para equilibrarse con la Velocidad de Desplazamiento (Vel.D.) de 8 cm/s. Por eso estas extrusiones no tienen continuidad, no obstante, estas no son malas noticias, dado que...

*¡Hemos logrado caracterizar nuestro proceso!*

Ahora sabemos qué combinación de variables necesitamos exactamente para que nuestro sistema sea capaz de generar Extrusiones Lineales Ideales a dos velocidades distintas, de 2 y 4 cm/s Con un peralte de capa (P.C.) de 2cm. y una boquilla de extrusión de 30 mm de diámetro utilizando nuestro material Mothra 1.

Tomando en cuenta lo anterior, podríamos teorizar que si duplicamos la Vel.E. en nuestra muestra 7 pasando de 1.5 s/rev, a .75 s/rev podríamos generar Extrusiones Lineales Ideales a una velocidad de 8 cm/s Sin embargo, esto no sería posible físicamente dadas las limitantes de torque de nuestro motor de extrusión.

Muestra	(Vel.E.) (seg./rev.)	(Vel.D.) (cm./seg.)	Ancho del cordón con (B) de 30mm (cm.)	(P.C) (cm.)	Peso del cordón en 30cm. (g.)	Revoluciones dadas por cada muestra	Variable dependiente #1 Vol.E (g./rev.)	Variable dependiente #2 (C.L.E.) Sí-No	Variabe dependiente #3 (E.L.I) Sí-No
7	0.75	8	4.17 +/- 10%	2	364 +/- 10%	5	72.8	Sí	Sí
8	1.5	8		2		2.5			
9	3	8		2		1.25			

Tabla 15. Vel.E. duplicada. Esteban Pérez de León. 2022

Con fines experimentales, las Vel.D. utilizadas en la investigación fueron de 2, 4 y 8 cm/s, pero teóricamente pudimos haber utilizado cualquiera entre 1 y 16 cm/s. Como ejemplo de esto presento la siguiente imagen, en la cual se observan 3 extrusiones lineales llevadas a cabo a una velocidad de 3 cm/s haciendo uso de las mismas Vel.E. utilizadas en nuestra experimentación: 1.5, 3 y 6 s/rev.

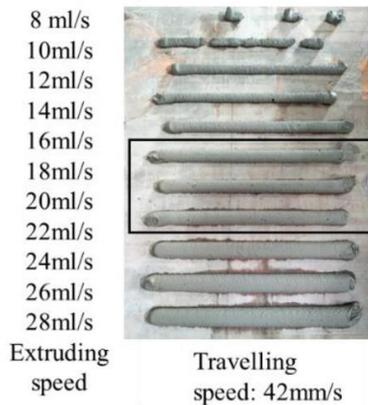


Imagen 88. Comparación entre velocidades de extrusión y desplazamiento. Esteban Pérez de León. 2022

Imagen 89. Comparación entre velocidades de extrusión y desplazamiento. Xiao et al. 2020

Las imágenes presentadas nos permiten llevar a cabo una pequeña comparación entre nuestros resultados y los obtenidos por otros investigadores, como por ejemplo en este caso Xiao et al.

Observemos como la tendencia se repite: Un bajo Vol. Ex se equilibra con una baja Vel.D., un alto Vol.E. se equilibra con una alta Vel.D. Es importante tomar esto en cuenta dado el problema acontecido anteriormente: nuestro motor de extrusión no cuenta con el torque necesario para extruir satisfactoriamente un cordón de Mothra1 a una velocidad de .75 s/rev. Dado lo anterior, y tras el análisis de los productos obtenidos por el sistema, presento en el siguiente capítulo una serie de posibles mejoras, cuya aplicación nos permitiría extruir mejor, y a mayores velocidades.

## Análisis de resultados: El Sistema.

El sistema desarrollado demostró su funcionalidad al extruir una serie de cordones de material para su posterior caracterización. Es importante mencionar que cada uno de estos cordones fueron extruidos por la máquina de manera programada por el operador quien era capaz de alterar el producto final a través de la combinación premeditada de las variables implicadas en la experimentación.

Tras una semana de operación regular, ninguno de los 18 componentes mecánicos que componen el prototipo sufrió daños o cambios físicos que afectasen su integridad como pieza útil dentro del sistema. Para lograr un entendimiento general del desempeño de cada componente, se desarrolló la siguiente tabla:

OBSERVACIONES MECÁNICAS S.I.T.A.							
No.	Nombre del componente	Material	Cantidad	¿Sufrió daños?	¿Cumplió su función?	¿Mejora detectada ?	¿Mejora funcional urgente?
1	cuerpo de contención	plástico PETG	1	NO	SI	SI	NO
2	cuerpo general	MDF	1	NO	SI	SI	NO
3	baleros	x	2	NO	SI	NO	NO
4	banda	x	1	NO	SI	NO	NO
5	boquilla	plástico PETG	1	NO	SI	NO	NO
6	cable de comunicación	x	1	NO	SI	SI	NO
7	caja de electrónicos	plástico PETG	1	NO	SI	SI	NO
8	eje de desplazamiento	acero	1	NO	SI	NO	NO
9	eje principal	acero	1	NO	SI	SI	SI
10	motor de desplazamiento	x	2	NO	SI	NO	NO
11	motor de extrusión	x	1	NO	SI	SI	SI
12	paletas de revolutura	plástico PETG	4	NO	SI	SI	NO
13	panel de control	x	1	NO	SI	NO	NO
14	piñón de desplazamiento	plástico PETG	2	NO	SI	SI	NO
15	piñón de extrusión	plástico PETG	2	NO	SI	SI	NO
16	riel de tracción	plástico PETG	30	NO	SI	SI	SI
17	rodamientos	plástico PETG	2	NO	SI	NO	NO
18	tornillo de extrusión	plástico PETG	4	NO	SI	SI	SI

Tabla 16. Análisis mecánico de componentes. Esteban Pérez de León. 2022

Se detectaron 11 componentes a mejorar para beneficio del desempeño del sistema a largo plazo. A continuación, se describirán de forma breve las mejoras propuestas para cada uno de los elementos resaltados en colores verde, para mejoras simples, y rojo, para mejoras urgentes.

<b>1.- Cuerpo de contención</b>		
Problema detectado	Descripción	Solución propuesta
<p>Líneas de impresión.</p> 	<p>La superficie de una impresión tridimensional suele ser estriada, producto de la superposición de capas. Estas generan superficies rugosas, perfectas para que materiales poco fluidos se adhieran a ella y ralenticen el sistema.</p>	<p>Una capa uniforme de impermeabilizante o recubrimiento epóxico sería más que suficiente para eliminar la rugosidad de la superficie, mientras que a su vez evitaría cualquier tipo de fuga al exterior del tanque.</p>

Tabla 17. Análisis mecánico del cuerpo de contención. Esteban Pérez de León. 2022

<b>2.- Cuerpo general</b>		
Problema detectado	Descripción	Solución propuesta
<p>El MDF sin tratar no resiste la intemperie, el agua puede deformarle.</p> 	<p>La presencia de humedad en una superficie no tratada genera impactos negativos en la misma, como el óxido en el metal.</p>	<p>Una capa uniforme de impermeabilizante o recubrimiento epóxico sería más que suficiente para sellar cualquier poro del material, extendiendo su vida útil.</p>

Tabla 18. Análisis mecánico del cuerpo general. Esteban Pérez de León. 2022

<b>6.- Cable de comunicación</b>		
Problema detectado	Descripción	Solución propuesta
<p>Cables sensibles, tienden a romperse.</p> 	<p>Los filamentos de Alucobre son muy sensibles y tienden a romperse si el cable se mueve o se dobla más de lo necesario.</p>	<p>Se propone introducir el elemento dentro de un organizador de cableado para evitar desgastes o roturas.</p>

Tabla 19. Análisis mecánico de los cables de comunicación. Esteban Pérez de León. 2022

<b>7.- Caja de electrónicos</b>		
Problema detectado	Descripción	Solución propuesta
Derrames de agua cerca del componente.	El componente no es impermeable y es posible que llegue a humedecerse.	La caja debe ser sujeta a rediseño para colocar empaques en sus tapas.

Tabla 20. *Análisis mecánico de la caja de electrónicos.* Esteban Pérez de León. 2022

<b>9.- Eje principal</b>		
Problema detectado	Descripción	Solución propuesta
<p>El eje no es concéntrico</p> 	<p>La rotación del eje no es concéntrica.</p> <p>Dado que el componente no fue maquinado, el giro se carga hacia un lado generando atascos y fricción con las paredes interiores del prototipo.</p> <p>Este problema derivó en que no fuese posible extruir partículas más grandes a 2mm de diámetro dadas las tolerancias entre los muros interiores del tanque y los componentes montados en el eje.</p>	<p>Maquinar el eje principal en un torno permitirá trabajar con una rotación perfectamente concéntrica.</p>

Tabla 21. *Análisis mecánico del eje principal.* Esteban Pérez de León. 2022

<b>11.- Motor de extrusión</b>		
Problema detectado	Descripción	Solución propuesta
El motor no trabajó correctamente al cargar el equipo con más de 5kg de material, imposibilitando extrusiones a alta velocidad.	En ocasiones el motor no contaba con el torque suficiente para operar correctamente, debido en parte al componente 9 y la reducción en la fluidez del material a través del tiempo.	Solucionar el problema de concentricidad del eje principal, de no mejorar, adoptar un motor más grande.

Tabla 22. *Análisis mecánico del motor de extrusión.* Esteban Pérez de León. 2022

<b>12.- Paletas de revoltura</b>		
Problema detectado	Descripción	Solución propuesta
<p>Remanentes de material en el componente.</p> 	<p>La mezcla no es desplazada al fondo del cabezal con facilidad dada la verticalidad de las paletas, estas solamente lo agitan.</p>	<p>Rotar las paletas algunos grados hacia abajo permitirá controlar el desplazamiento de la mezcla hacia el fondo del cabezal.</p>

Tabla 23. Análisis mecánico de las paletas de revoltura. Esteban Pérez de León. 2022

<b>14.- Piñón de desplazamiento</b>		
Problema detectado	Descripción	Solución propuesta
<p>Desgaste por fricción.</p> 	<p>Es probable que a la larga el desgaste del piñón fabricado en material PETG evite el funcionamiento correcto del sistema.</p>	<p>Fabricar la pieza en aluminio (el prototipo sigue bajo observación, es posible que este cambio no sea necesario)</p>

Tabla 24. Análisis mecánico del piñón de desplazamiento. Esteban Pérez de León. 2022

<b>15.- Piñón de extrusión</b>		
Problema detectado	Descripción	Solución propuesta
<p>Desgaste por fricción.</p> 	<p>Es probable que a la larga el desgaste del piñón fabricado en material PETG evite el funcionamiento correcto del sistema</p>	<p>Fabricar la pieza en aluminio (el prototipo sigue bajo observación, es posible que este cambio no sea necesario)</p>

Tabla 25. Análisis mecánico del piñón de extrusión. Esteban Pérez de León. 2022

<b>16.- Riel de tracción</b>		
Problema detectado	Descripción	Solución propuesta
<p>Desgaste por fricción y vibraciones no deseadas.</p>  <p style="color: red; font-size: small;">Juntas desiguales</p>	<p>Es probable que a la larga el desgaste del riel fabricado en PETG evite el funcionamiento correcto del sistema, por otro lado, el componente "riel" está conformado por rieles más pequeños de 16cm c/u, la junta entre rieles genera un "salto" en el sistema de desplazamiento.</p>	<p>Maquinar el riel en aluminio: 1.- en una sola pieza, o 2.- piezas más largas, o 3.- piezas igual de cortas con uniones exactas entre sí para evitar obstáculos lineales.</p>

Tabla 26. Análisis mecánico del riel de tracción. Esteban Pérez de León. 2022

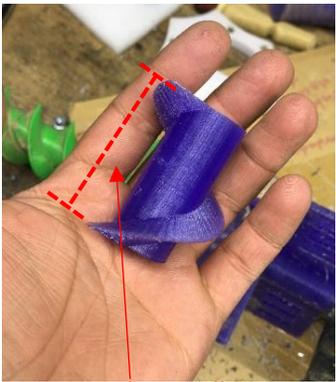
<b>18.- Tornillo de extrusión</b>		
Problema detectado	Descripción	Solución propuesta
<p>El flujo de material no es suficiente para lograr E.L.I.s a más de 4 cm/s</p>  <p style="color: red; font-size: small;">paso de tornillo muy amplio</p>	<p>El tornillo de extrusión utilizado resultó efectivo para lograr una ELI a una velocidad de desplazamiento máxima de 4cm/s.</p>	<p>Es probable que, con modificaciones físicas al tornillo de extrusión, se logre aumentar el volumen de material extruido sin aumentar la velocidad de extrusión. Esto le permitiría al sistema desarrollar E.L.I.s a mayor velocidad.</p>

Tabla 27. Análisis mecánico del tornillo de extrusión. Esteban Pérez de León. 2022



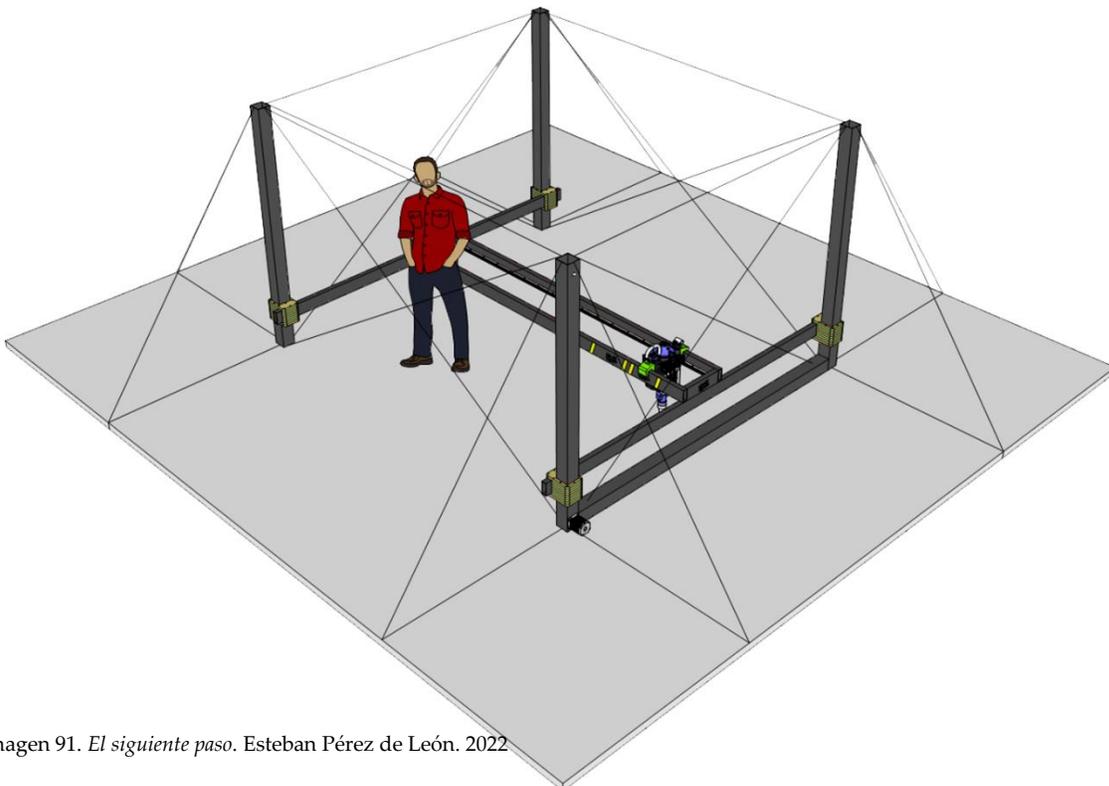
## CONCLUSIONES

## 9.- Conclusiones.

El producto desarrollado a lo largo del presente trabajo tuvo sus bases en una serie de indicadores pasados, actuales y futuros conocidos, no solo respecto al uso de la tecnología de fabricación aditiva enfocada a la construcción, sino también respecto a la necesidad de desarrollar hábitat de manera holística en beneficio de nuestro planeta y nuestra sociedad.

Nuestra hipótesis ha quedado comprobada tras lograr fabricar una herramienta que sirvió para demostrar cómo a través de una específica combinación de variables determinadas por un usuario es posible producir, reproducir y personalizar una Extrusión Lineal Ideal, producto base para el desarrollo de arquitectura impresa en 3D.

Muy pronto podremos aportar conocimiento a esta disciplina de creciente relevancia mundial a la cuál dado que ya contamos con una tecnología lista para ser optimizada e implementada en nuestra institución como herramienta de estudio y enseñanza para las nuevas generaciones **no sólo de arquitectos** interesados en aprender más acerca de esta técnica constructiva.



Considero el estudio de este tema imperativo en México. Estoy convencido de que la adopción de esta tecnología puede beneficiarnos como país y fue bajo esa premisa que decidí darle un enfoque de fácil replicabilidad al sistema.

*El acceso a la tecnología y al conocimiento no debe quedar en manos de unos cuantos.*

El costo total de los materiales que conforman el aparato presentado rondó a lo largo de 2020 y 2021 los 20, 000 pesos mexicanos. Recordemos que para llevar a cabo un desplazamiento tridimensional de nuestro cabezal extrusor y su eje de desplazamiento "X", es necesario fabricar un eje "Y", un eje "Z", que ya han sido diseñados y fueron cotizados en material en 40, 000 pesos mexicanos. Con respecto al software para su operación completa, hoy en día ha sido cotizado en 60, 000 pesos mexicanos.

Estamos hablando de un sistema cuyo costo de fabricación no superaría los 200, 000 pesos mexicanos en 2023. Es decir, la decimoctava parte del costo de la máquina más sencilla fabricada por la empresa europea COBOD.

Su bajo costo, fácil mantenimiento, reparabilidad, escalabilidad y sus características de hardware y software abierto hacen de este sistema una opción viable para el desarrollo de medio construido por un costo más bajo que el costo promedio de un vehículo vendido en México en el año 2021<sup>91</sup>.

Imaginemos un futuro en el que cada núcleo familiar cuente con una herramienta que le permita construir y reconstruir su arquitectura para responder directamente a los constantes cambios físicos, económicos y sociales de nuestra sociedad.

Una herramienta cuya esencia ayude a eliminar las tan nocivas brechas transdisciplinarias que enfrentamos al desarrollar tecnología.

---

<sup>91</sup> "¿Cuánto cuesta tener un auto en México?", La Silla Rota, consultado el 23 de enero de 2023, <https://lasillarota.com/dinero/2021/9/21/cuanto-cuesta-tener-un-auto-en-mexico-297227.html>.

Queda comprobado que un arquitecto **puede** desarrollar tecnología fuera de su campo de estudio.

Pero **¿debe?**

Espero que la respuesta a esta pregunta sea diferente a la que usted, estimado lector, hubiese dado antes de tomarse el tiempo de leer este trabajo. No cabe duda de que el producto de esta investigación no hubiese sido el mismo de no haber contado yo con cierta experiencia en otros campos de conocimiento. Y es bajo esta premisa que me atrevo a defender la idea de Transdisciplinariedad, puesto que la he gozado, y la he padecido.

Dígame usted estimado lector, ¿en qué universo, un alumno Licenciado como simple arquitecto pudo haber generado conocimiento sin el apoyo y presencia de otros campos y ramas de investigación? ¿Acaso el arquitecto mexicano está condenado a generar solamente propuestas mediocres embarradas de mortero y estructuradas con acero con apellido de tecnología para la arquitectura? Porque pareciese que eso es arquitectura del siglo XXI para algunos profesionales del gremio.

*Quizás son estos profesionales los que ralentizan el desarrollo y muy probable brillante futuro de docenas de jóvenes en esta y otras instituciones en donde la raza pesa más que el espíritu.*

Y es por esto, por lo que para automatizar la construcción y desarrollar arquitectura impresa en 3D deben dominarse una máquina o herramienta, un material y una técnica constructiva, que basa sus principios en la tecnología de fabricación aditiva...

## Apéndice

## Una de muchas propuestas conceptuales

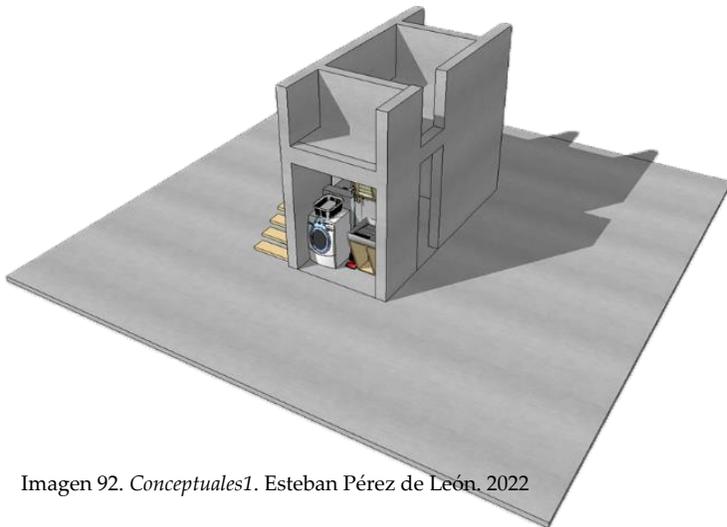


Imagen 92. *Conceptuales1*. Esteban Pérez de León. 2022

El concepto es el siguiente: Se diseña un núcleo estructural en cuyo interior se alojarán instalaciones y servicios básicos como sanitario, cocina y cisterna. Este núcleo estructural debe tener la capacidad de ser replicado en sentido vertical, con el fin de brindar la opción de expansión a

un primer o segundo nivel, o más, dependiendo de las capacidades del núcleo central. Su fabricación puede ser industrializada y optimizada para requerimientos constructivos específicos.

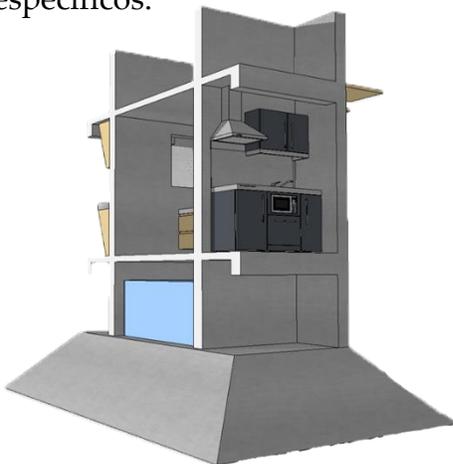


Imagen 93. *Concept2*. Esteban Pérez de León. 2022

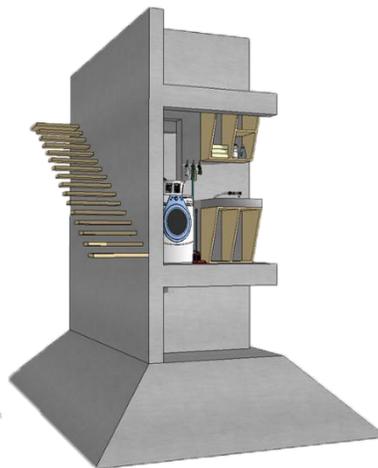


Imagen 94. *Concept3*. Esteban Pérez de León. 2022

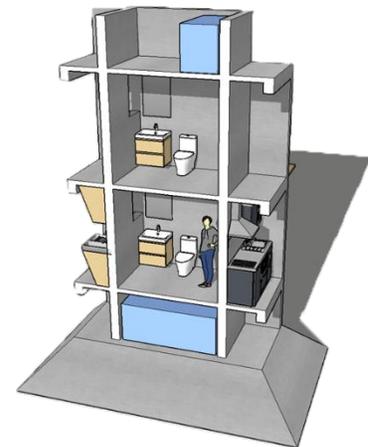


Imagen 95. *Concept4*. Esteban Pérez de León. 2022

El diseño de la vivienda va en función de sus usuarios y del tamaño y tipo de núcleo estructural que escogieron en un principio. Los muros perimetrales y divisorios de la vivienda serían fabricados por nuestro sistema de fabricación aditiva empotrado al núcleo estructural.

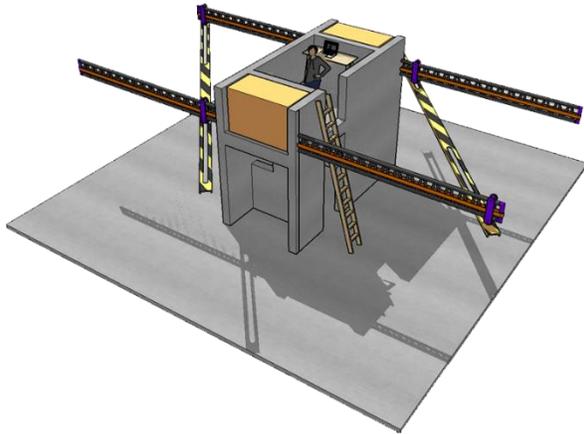


Imagen 96. Concept5. Esteban Pérez de León. 2022

necesidades de venta o cambio de uso de suelo (el núcleo completo puede ser vendido para su reutilización por otra familia o empresa con distintas necesidades), etc. El uso de una mezcla específica de materiales es esencial para cumplir con las bases del proyecto; la reutilización de material demolido o el aprovechamiento del material excavado para la cimentación del núcleo.

La idea de que el sistema sea modular, además de poseer en su interior el mismo sistema de fabricación, viene de la necesidad de ajustar la vivienda a nuevas necesidades, ya sean estas de expansión (por la llegada de un inquilino nuevo, la necesidad de rentar un espacio) de adaptación (para desarrollar locales comerciales en planta baja)

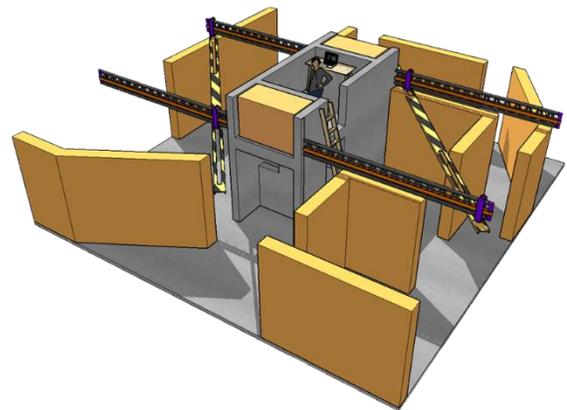


Imagen 97. Concept6. Esteban Pérez de León. 2022

*“El medio construido evoluciona con el usuario mientras se adapta físicamente a los cambios que su sociedad le exige”*

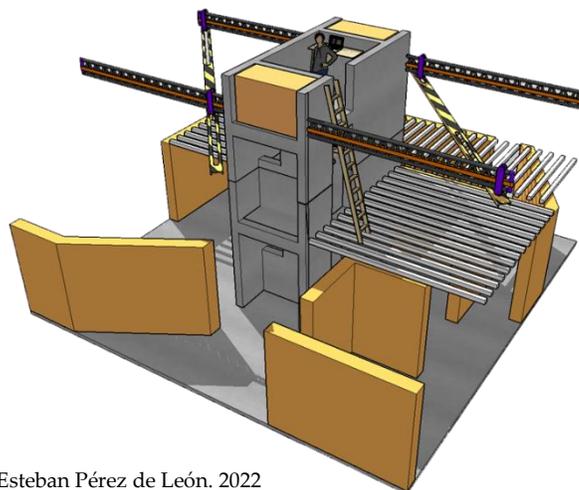


Imagen 98. Concept7. Esteban Pérez de León. 2022

## Nuestro escenario soñado

Recién recibimos los resultados del análisis de suelos, perfecto, la tercera parte del volumen de mi excavación podrá ser mezclada con otros agregados naturales para la construcción, excelentes noticias para el cliente, reducción de costos. Hemos determinado que nuestro muro sur, corre riesgos de sobrecalentamiento, pero sabemos que los vientos dominantes provenientes del noroeste pueden ayudar a reducir la ganancia de calor de este. Procedemos a diseñar, quizás un muro más robusto y con un parámetro de relleno cúbico ayude a mantener el calor al interior de la construcción en invierno, y un muro tipo celosía ayude a la ventilación cruzada sin perder la privacidad que el cliente me contó, de manera muy puntual, quisiera conservar. El patrón de relleno y la misma superficie que he diseñado para la fachada servirán como ductos de ventilación, no he necesitado consultar sistemas de fachada ventilada, no dependo de sus productos, diseños o tiempos de instalación, yo mismo he integrado el sistema dentro de mi diseño apoyándome en software de diseño paramétrico, eso sí, tomando en cuenta el acabado sobrio, que la esposa de mi cliente hizo hincapié en buscar. Ahora debo hallar, dentro del catálogo de materiales extruibles, alguna mezcla que me permita mantener niveles adecuados de humedad al interior del edificio, pero que también permitan una cancelación sonora del exterior de un 80%, es agradable saber que lo único que debo hacer es colocar la mezcla ideal dentro del tanque de materiales y dejar que la máquina los deposite en el terreno conforme a las necesidades de mis clientes. No he de preocuparme por los traslados de maquinaria pesada, o por la difícil o tediosa instalación de mi sistema de fabricación aditiva, ya que este está integrado en lo que será la estructura de mi proyecto, sí, aquel único muro cimentado en el cual se encuentran empotradas las escaleras, aquél único elemento de concreto posee en su interior un mecanismo de grúas capaces de ser operadas en cualquier momento con tan solo unos ajustes. Buena idea de mis clientes hacerse de este sistema, de esta manera se hace más sencillo adaptar la casa

para nuevos inquilinos, quizás en algunos años me llamen nuevamente para la ampliación o rediseño del espacio, o quizás decidan mudarse y rentar el sistema a algún usuario deseoso de erigir en ese mismo sitio, un par de locales comerciales. Me sigue sorprendiendo la capacidad de este sistema de adecuarse a su contexto social. Me ha contado un vecino que, en su mismo terreno, y haciendo uso del mismo núcleo estructural, han vivido ya otras dos familias, nunca dejaré de sorprenderme la facilidad con la que estos materiales pueden ser reutilizados tras el simple hecho de demolerles y reprocesarlos para dar pie a una nueva construcción.

## 11.- Bibliografía

- "3D Printers, Software, Manufacturing & Digital Healthcare | 3D Systems". Consultado el 5 de enero de 2023. <https://www.3dsystems.com/>.
- "772d227d-d168-efc4-a2e3-86ba78c80cb4.pdf". Consultado el 10 de enero de 2023. <https://www.cemexmexico.com/documents/27057941/45587277/aplicaciones-manual-construccion-general.pdf/772d227d-d168-efc4-a2e3-86ba78c80cb4>.
- "A Sustainable Saudi Vision - Vision 2030". Consultado el 5 de enero de 2023. <https://www.vision2030.gov.sa/v2030/a-sustainable-saudi-vision/>.
- "Achievement Award 2014". Consultado el 13 de enero de 2021. [https://www.ieice.org/eng/about\\_ieice/new\\_honorary\\_members\\_award\\_winners/2014/gyouseki\\_06e.html](https://www.ieice.org/eng/about_ieice/new_honorary_members_award_winners/2014/gyouseki_06e.html).
- Albar, Abdulrahman, Mehdi Chougan, Mazen J. Al- Kheetan, Mohammad Rafiq Swash, y Seyed Hamidreza Ghaffar. "Effective Extrusion-Based 3D Printing System Design for Cementitious-Based Materials". *Results in Engineering* 6 (junio de 2020): 100135. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2020.100135>.
- Arizpe, Lourdes. "Migración, etnicismo y cambio económico (un estudio sobre migrantes campesinos a la ciudad de México)", s/f, 271.
- Attaran, Mohsen. "The Rise of 3-D Printing: The Advantages of Additive Manufacturing over Traditional Manufacturing". *Business Horizons* 60, núm. 5 (septiembre de 2017): 677–88. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2017.05.011>.
- Buswell, R.A., W.R. Leal de Silva, S.Z. Jones, y J. Dirrenberger. "3D Printing Using Concrete Extrusion: A Roadmap for Research". *Cement and Concrete Research* 112 (octubre de 2018): 37–49. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.05.006>.
- Cerquera, Clemencia Santos, Irma Escamilla Herrera, y Lizbeth Guarneros Avilés. "Expansión urbana al norte de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México: ¿un triángulo de deterioro ambiental sin posibilidad de desarrollo sustentable?", s/f, 27.
- Chuck Hull - Inventor, Innovator, Icon - The Story of How 3D Printing Came to Be., 2013. <https://www.youtube.com/watch?v=yQMJA45gFE>.
- COBOD. "La impresora 3D de construcción BOD2 | COBOD International". Consultado el 4 de enero de 2023. <https://cobod.com/es/productos/bod2/>.
- Cordero, Olga Sánchez, y Graciela Márquez Colín. "Consejo Nacional de Población", s/f, 68.
- Crump, S. Scott. Apparatus and method for creating three-dimensional objects. United States US5121329A, filed el 30 de octubre de 1989, y issued el 9 de junio de 1992. <https://patents.google.com/patent/US5121329A/en>.
- "¿Cuáles son los Derechos Humanos? | Comisión Nacional de los Derechos Humanos - México". Consultado el 11 de febrero de 2021. <https://www.cndh.org.mx/derechos-humanos/cuales-son-los-derechos-humanos>.
- Delgadillo, V., Víctor. "Ciudades iletradas: orden urbano y asentamientos populares irregulares en la ciudad de México". *Territorios* 18, núm. 35 (el 15 de agosto de 2016): 81–99. <https://doi.org/10.12804/territ35.2016.04>.
- Environment, U. N. "Sustainable Buildings". UNEP - UN Environment Programme, el 26 de septiembre de 2017. <http://www.unenvironment.org/explore-topics/resource-efficiency/what-we-do/cities/sustainable-buildings>.
- Federal, Sociedad Hipotecaria. "Estado Actual de la Vivienda en México (EAVM) 2017". gob.mx. Consultado el 12 de febrero de 2021. <http://www.gob.mx/shf/documentos/estado-actual-de-la-vivienda-en-mexico-eavm-2017>.

“GBES-LEED-Green-Associate-Exam-Prep-Study-Guide-LEED-v4-Edition.pdf”, s/f.

Geografía (INEGI), Instituto Nacional de Estadística y. “Marco Geoestadístico”. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. INEGI. Consultado el 9 de febrero de 2021. <https://www.inegi.org.mx/temas/mg/#Descargas>.

Hull, Charles W. Method and apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography. European Union EP0171069B1, filed el 6 de agosto de 1985, y issued el 18 de noviembre de 1993. <https://patents.google.com/patent/EP0171069B1/en?inventor=charles+w+hull&before=priority:19900101&after=priority:19800101>.

Hwang, Dooil, y Behrokh Khoshnevis. “An Innovative Construction Process-Contour Crafting (CC)”. Ferrara, Italy, 2005. <https://doi.org/10.22260/ISARC2005/0004>.

IAAC. “ABOUT IAAC - Institute for Advanced Architecture of Catalonia”. Consultado el 4 de enero de 2023. <https://iaac.net/iaac/about/>.

IAAC. “Building Architecture Continuity”. Consultado el 4 de enero de 2023. <https://iaac.net/project/building-architecture-continuity/>.

IAAC. “Digital Adobe”. Consultado el 4 de enero de 2023. <https://iaac.net/project/digital-adobe/>.

IAAC. “Postgraduate in 3D Printing Architecture - IAAC Barcelona”. Consultado el 4 de enero de 2023. <https://iaac.net/educational-programmes/applied-research-programmes/otf-3d-printing-architecture/>.

IAAC. “TerraPerforma - Institute for Advanced Architecture of Catalonia”. Consultado el 11 de octubre de 2020. <https://iaac.net/project/terraperforma/>.

Ibn-Mohammed, T., R. Greenough, S. Taylor, L. Ozawa-Meida, y A. Acquaye. “Operational vs. Embodied Emissions in Buildings—A Review of Current Trends”. *Energy and Buildings* 66 (noviembre de 2013): 232–45. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.07.026>.

ICON. “3D Technology”. Consultado el 5 de enero de 2023. <https://www.iconbuild.com/>.

“Indicadores Demográficos de México de 1970 a 2050 | Gobierno | CONAPO | datos.gob.mx”. Consultado el 9 de febrero de 2021. [http://www.conapo.gob.mx/work/models/CONAPO/Mapa\\_Ind\\_Dem18/index.html](http://www.conapo.gob.mx/work/models/CONAPO/Mapa_Ind_Dem18/index.html).

“Javier Letón Carrasco, Automatización en la Construcción.pdf”, s/f.

Khoshnevis, Behrokh. “Automated Construction by Contour Crafting—Related Robotics and Information Technologies”. *Automation in Construction* 13, núm. 1 (enero de 2004): 5–19. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2003.08.012>.

Khoshnevis, Behrokh, Satish Bukkapatnam, Hongkyu Kwon, y Jason Saito. “Experimental Investigation of Contour Crafting Using Ceramics Materials”. *Rapid Prototyping Journal* 7, núm. 1 (marzo de 2001): 32–42. <https://doi.org/10.1108/13552540110365144>.

Khoshnevis, Behrokh, y Rosanne Dutton. “Innovative Rapid Prototyping Process Makes Large Sized, Smooth Surfaced Complex Shapes in a Wide Variety of Materials”. *Materials Technology* 13, núm. 2 (enero de 1998): 53–56. <https://doi.org/10.1080/10667857.1998.11752766>.

Khoshnevis, Behrokh, Dooil Hwang, Ke Thia Yao, y Zhenghao Yeh. “Mega-Scale Fabrication by Contour Crafting”. *International Journal of Industrial and Systems Engineering* 1, núm. 3 (2006): 301. <https://doi.org/10.1504/IJISE.2006.009791>.

Kodama, Hideo. “Automatic Method for Fabricating a Three-dimensional Plastic Model with Photo-hardening Polymer”. *Review of Scientific Instruments* 52, núm. 11 (noviembre de 1981): 1770–73. <https://doi.org/10.1063/1.1136492>.

La Silla Rota. “¿Cuánto cuesta tener un auto en México?” Consultado el 23 de enero de 2023. <https://lasillarota.com/dinero/2021/9/21/cuanto-cuesta-tener-un-auto-en-mexico-297227.html>.

- Le, T. T., S. A. Austin, S. Lim, R. A. Buswell, A. G. F. Gibb, y T. Thorpe. "Mix Design and Fresh Properties for High-Performance Printing Concrete". *Materials and Structures* 45, núm. 8 (agosto de 2012): 1221–32. <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9828-z>.
- Lewis, Peter H. "BUSINESS TECHNOLOGY: ADVANCES; From Screen to Solid 3-D Model In a Matter of Minutes". *The New York Times*, el 16 de marzo de 1988, sec. Business. <https://www.nytimes.com/1988/03/16/business/business-technology-advances-screen-solid-3-d-model-matter-minutes.html>.
- Lim, S., R.A. Buswell, T.T. Le, S.A. Austin, A.G.F. Gibb, y T. Thorpe. "Developments in Construction-Scale Additive Manufacturing Processes". *Automation in Construction* 21 (enero de 2012): 262–68. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2011.06.010>.
- Lim, Sungwoo, Richard A. Buswell, Philip J. Valentine, Daniel Piker, Simon A. Austin, y Xavier De Kestelier. "Modelling Curved-Layered Printing Paths for Fabricating Large-Scale Construction Components". *Additive Manufacturing* 12 (octubre de 2016): 216–30. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2016.06.004>.
- Lim, Sungwoo, Thanh Le, John Webster, Richard Buswell, Simon Austin, Alistair Gibb, y Tony Thorpe. "FABRICATING CONSTRUCTION COMPONENTS USING LAYERED MANUFACTURING TECHNOLOGY", s/f, 11.
- Malaeb, Zeina, Hussein Hachem, Adel Tourbah, Toufic Maalouf, Nader Zarwi, y Farook Hamzeh. "3D Concrete Printing: Machine and Mix Design". *International Journal of Civil Engineering and Technology* 6 (el 1 de junio de 2015): 14–22.
- Masters, William E. Computer automated manufacturing process and system. United States US4665492A, filed el 2 de julio de 1984, y issued el 12 de mayo de 1987. <https://patents.google.com/patent/US4665492/en>.
- mkt. "ÉCHALE". *ÉCHALE* (blog). Consultado el 5 de enero de 2023. <https://echale.mx/>.
- Nerella, Venkatesh Naidu, y Viktor Mechtcherine. "Studying the Printability of Fresh Concrete for Formwork-Free Concrete Onsite 3D Printing Technology (CONPrint3D)". En *3D Concrete Printing Technology*, 333–47. Elsevier, 2019. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815481-6.00016-6>.
- New Story. "3D Community". Consultado el 5 de enero de 2023. <https://newstorycharity.org/3d-community/>.
- New Story. "New Story - We Pioneer Solutions to End Homelessness | Home". Consultado el 5 de enero de 2023. <https://newstorycharity.org/>.
- OECD. *OECD Territorial Reviews: Valle de México, Mexico*. OECD Territorial Reviews. OECD, 2015. <https://doi.org/10.1787/9789264245174-en>.
- "ONU-Habitat - Superficie de CDMX crece a ritmo tres veces superior al de su población". Consultado el 9 de febrero de 2021. <https://onuhabitat.org.mx/index.php/superficie-de-cdmx-crece-a-ritmo-tres-veces-superior-al-de-su-poblacion>.
- "Overview | IEICE The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers". Consultado el 16 de enero de 2021. [https://www.ieice.org/eng\\_r/about/overview.html](https://www.ieice.org/eng_r/about/overview.html).
- PERI. "The BOD Building". Consultado el 4 de enero de 2023. <https://www.peri-usa.com/3d-constructionprinting/the-bod-building.html>.
- Pham, D.T, y R.S Gault. "A Comparison of Rapid Prototyping Technologies". *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 38, núm. 10–11 (octubre de 1998): 1257–87. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(97\)00137-5](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(97)00137-5).
- "Programa de Ordenación de la Zona Metropolitana del Valle de México.pdf", s/f.
- Ravenstein, E. G. "The Laws of Migration". *Journal of the Statistical Society of London* 48, núm. 2 (junio de 1885): 167. <https://doi.org/10.2307/2979181>.
- Serrano, Adolfo Nadal. "Más Allá Del Prototipado Rápido: Automatización Robótica de Impresión 3D Para La Construcción", s/f, 234.

- Sher, Davide. "Carl Robert Deckard, Inventor of SLS, Dies at 58". *3D Printing Media Network - The Pulse of the AM Industry* (blog), el 30 de diciembre de 2019.  
<https://www.3dprintingmedia.network/carl-robert-deckard-inventor-of-sls-dies-at-58/>.
- "Stampanti 3D | WASP | Azienda leader nel settore della stampa 3D". Consultado el 4 de enero de 2023.  
<https://www.3dwasp.com/>.
- Tay, Yi Wei Daniel, Biranchi Panda, Suvash Chandra Paul, Nisar Ahamed Noor Mohamed, Ming Jen Tan, y Kah Fai Leong. "3D Printing Trends in Building and Construction Industry: A Review". *Virtual and Physical Prototyping* 12, núm. 3 (el 3 de julio de 2017): 261–76.  
<https://doi.org/10.1080/17452759.2017.1326724>.
- "The Father of 3D Printing – Bill Masters". Consultado el 16 de enero de 2021.  
<http://billmasters3d.com/father-of-3d-printing/>.
- Turner, John C. "Housing Priorities, Settlement Patterns, and Urban Development in Modernizing Countries". *Journal of the American Institute of Planners* 34, núm. 6 (noviembre de 1968): 354–63. <https://doi.org/10.1080/01944366808977562>.  
 "US4944817.pdf", s/f.
- Vantyghe, Gieljan, Wouter De Corte, Emad Shakour, y Oded Amir. "3D Printing of a Post-Tensioned Concrete Girder Designed by Topology Optimization". *Automation in Construction* 112 (abril de 2020): 103084. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103084>.
- Xiao, Jianzhuang, Shuai Zou, Ying Yu, Yu Wang, Tao Ding, Ying Zhu, Jiangtao Yu, et al. "3D Recycled Mortar Printing: System Development, Process Design, Material Properties and on-Site Printing". *Journal of Building Engineering* 32 (noviembre de 2020): 101779.  
<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101779>.
- Zhang, Jing, y Behrokh Khoshnevis. "Optimal Machine Operation Planning for Construction by Contour Crafting". *Automation in Construction* 29 (enero de 2013): 50–67.  
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.08.006>.

## 12.- Índice de Imágenes

Imagen 1. <i>Básicos de impresión</i> . Esteban Pérez de León. 2022 .....	19
Imagen 2. <i>Trayectoria de impresión</i> . Esteban Pérez de León. 2022 .....	19
Imagen 3. <i>Capa de impresión</i> . Esteban Pérez de León. 2022.....	20
Imagen 4. <i>Volumen de impresión</i> . Esteban Pérez de León. 2022 .....	20
Imagen 5. <i>Partes de una “E.L.I.”</i> . Esteban Pérez de León. 2022 .....	21
Imagen 6. <i>“E.L.I.” D=X</i> . Esteban Pérez de León. 2022 .....	21
Imagen 7. <i>“E.L.I.” D=X/2</i> . Esteban Pérez de León. 2022 .....	21
Imagen 8. <i>Riesgo de colapso entre capas</i> . Esteban Pérez de León. 2022.....	22
Imagen 9. <i>Apilabilidad en capas</i> . Esteban Pérez de León. 2022 .....	22
Imagen 10. <i>Bosquejos esquemáticos de los tres tipos de aparatos construidos en el artículo: “Automatic method for fabricating a three-dimensional plastic model with photo-hardening polymer”</i> . Hideo Kodama. 1981.....	25
Imagen 11. <i>Bosquejos esquemáticos de la solidificación causada por sobre exposición y poca exposición en el artículo: “Automatic method for fabricating a three-dimensional plastic model with photo-hardening polymer”</i> . Hideo Kodama. 1981.....	25
Imagen 12. <i>Fig. 1, U.S. Patent 4,665,492. William E. Masters. 1987.</i> .....	27
Imagen 13. <i>Fig. 2-A, Fig. 2-B, Fig. 2-C, U.S. Patent 4,665,492. William E. Masters. 1987</i> .....	27
Imagen 14. <i>Sección esquemática de la invención, European Patent 85109899.6. Charles W. Hull. 1993.</i> .....	28
Imagen 15. <i>Secciones esquemáticas de la invención, mostrando otro tipo de configuración, European Patent 85109899.6. Charles W. Hull. 1993.</i> .....	28
Imagen 16. <i>U.S. Patent 4,938,816, Método y aparato para sinterización selectiva. Carl Deckard. 1989.</i> .....	29
Imagen 17. <i>BUSINESS TECHNOLOGY: ADVANCES; “From Screen to Solid 3-D Model In a Matter of Minutes”</i> . The New York Times. 1988.....	30
Imagen 18. <i>Corte comparativo de acabados en capas. Behrokh Khoshnevis. 2006.</i> .....	31
Imagen 19. <i>Mecanismo de extrusión y relleno. Behrokh Khoshnevis. 2005.</i> .....	32
Imagen 20. <i>Proceso del Contour Crafting. Behrokh Khoshnevis. 2004.</i> .....	34
Imagen 21. <i>Esquema de muro elaborado mediante Contour Crafting. Behrokh Khoshnevis. 2006.</i> .....	36
Imagen 22. <i>Muro de concreto elaborado mediante Contour Crafting. Behrokh Khoshnevis. 2006</i> .....	36
Imagen 23. <i>Procedimiento de depósito de concreto. Behrokh Khoshnevis. 2005.</i> .....	37
Imagen 24. <i>Depositando concreto fresco, capa por capa. Behrokh Khoshnevis. 2005.</i> .....	37
Imagen 25. <i>Tendencia de publicaciones con respecto a la impresión tridimensional en la construcción. Yi Wei Daniel Tay et al. 2017.</i> .....	38
Imagen 26. <i>Módulos impresos del proyecto Terra Performa. I.A.A.C. - O.T.F. 2017.</i> .....	41
Imagen 27. <i>Ensamble final del proyecto Digital Adobe. I.A.A.C. - O.T.F. 2018.</i> .....	42
Imagen 28. <i>Proceso de impresión de módulos para proyecto Terra Performa. I.A.A.C. – O.T.F. 2017.</i> .....	44
Imagen 29. <i>Diseño esquemático del proyecto Terra Performa. I.A.A.C. – O.T.F. 2017.</i> .....	45
Imagen 30. <i>Ensamble final del proyecto Terra Performa. I.A.A.C. – O.T.F. 2017.</i> .....	45
Imagen 31. <i>Diseño esquemático del proyecto Building Architecture Continuity. I.A.A.C. – O.T.F. 2019.</i> .....	47
Imagen 32. <i>Ensamble final del Proyecto Building Architecture Continuity. I.A.A.C. – O.T.F. 2019.</i> .....	47
Imagen 33. <i>Planta de la casa B.O.D. COBOD. 2017</i> .....	48
Imagen 34. <i>Render de la casa B.O.D. COBOD. 2017</i> .....	48
Imagen 35. <i>Sistema X,Y,Z. COBOD. 2020.</i> .....	49
Imagen 36. <i>Sistema de impresión COBOD de 18m2 de área de impresión. COBOD. 2020.</i> .....	49

Imagen 37. <i>Casa impresa en 3D en Tabasco, México</i> . New Story. 2019.....	51
Imagen 38. <i>Saudi Vision 2030</i> . Gobierno de Arabia Saudita. 2016 .....	52
Imagen 39. <i>Preparación del taller</i> . Esteban Pérez de León. 2022.....	53
Imagen 40. <i>Proceso mecánico de la extrusión de materiales</i> . Esteban Pérez de León. 2022.....	54
Imagen 41. <i>Extrusión 5x5</i> . Esteban Pérez de León. 2022 .....	56
Imagen 42. <i>Extrusión 10x10</i> . Esteban Pérez de León. 2022 .....	56
Imagen 43. <i>Relación entre tiempo impresión y trabajabilidad de material</i> . Esteban Pérez de León. 2022.....	57
Imagen 44. <i>Extrusión con agregados</i> . Esteban Pérez de León. 2022.....	58
Imagen 45. <i>Nueva relación entre tiempo impresión y trabajabilidad de material</i> . Esteban Pérez de León. 2022.....	58
Imagen 46. <i>Sistema de extrusión propuesto por Malaeb et al</i> . Malaeb et al. 2019.....	60
Imagen 47. <i>Sistema de extrusión propuesto por Le et al et al</i> . Le et al et al. 2012 .....	60
Imagen 48. <i>Sistema de extrusión propuesto por Zou et al</i> . Zou et al. 2020 .....	60
Imagen 49. <i>Sistema de extrusión propuesto por Albar et al</i> . Albar et al 2020 .....	61
Imagen 50. <i>Sistema de extrusión propuesto por Nerella et al</i> . Nerella et al 2019 .....	61
Imagen 51. <i>Componentes generales del cuerpo de contención</i> . Esteban Pérez de León. 2022.....	63
Imagen 52. <i>Cilindro de contención recién impreso</i> . Esteban Pérez de León. 2022.....	65
Imagen 53. <i>Cilindro de contención en preimpresión, software Slic3r</i> . Esteban Pérez de León. 2022 .....	65
Imagen 54. <i>Componentes impresos del cuerpo de contención</i> . Esteban Pérez de León. 2022 .....	66
Imagen 55. <i>Cuerpo de contención, del software a la realidad</i> . Esteban Pérez de León. 2022 .....	66
Imagen 56. <i>Ensamble</i> . Esteban Pérez de León. 2022.....	67
Imagen 57. <i>Ensamble2</i> . Esteban Pérez de León. 2022.....	67
Imagen 58. <i>Ensamble3</i> . Esteban Pérez de León. 2022.....	67
Imagen 59. <i>Ensamble4</i> . Esteban Pérez de León. 2022.....	67
Imagen 60. <i>Objetivo3D</i> . Esteban Pérez de León. 2022 .....	67
Imagen 61. <i>Ensamble5</i> . Esteban Pérez de León. 2022.....	67
Imagen 62. <i>Paletas</i> . Esteban Pérez de León. 2022.....	68
Imagen 63. <i>El eje principal</i> . Esteban Pérez de León. 2022 .....	68
Imagen 64. <i>Paletas2</i> . Esteban Pérez de León. 2022.....	68
Imagen 65. <i>Eje principal tras experimentación</i> . Esteban Pérez de León. 2022 .....	68
Imagen 66. <i>Tornillos de extrusión tipo 1 y 2</i> . Esteban Pérez de León. 2022.....	68
Imagen 67. <i>Soldando</i> . Esteban Pérez de León. 2022 .....	69
Imagen 68. <i>Personalizando</i> . Esteban Pérez de León. 2022.....	69
Imagen 69. <i>Riel de experimentación</i> . Esteban Pérez de León. 2022 .....	69
Imagen 70. <i>El ensamble final</i> . Esteban Pérez de León. ....	70
Imagen 71. <i>Tablero de control</i> . Esteban Pérez de León. 2022 .....	71
Imagen 72. <i>Diagrama de flujo del sistema de control</i> . Esteban Pérez de León. 2022 .....	71
Imagen 73. <i>Interfaz del equipo</i> . Esteban Pérez de León. 2022.....	73
Imagen 74. <i>Obteniendo variable de Volumen de material</i> . Esteban Pérez de León. 2022 .....	74
Imagen 75. <i>Obteniendo variable de Calidad lineal de extrusión</i> . Esteban Pérez de León. 2022.....	75
Imagen 76. <i>Obteniendo variable de Extrusión lineal ideal</i> . Esteban Pérez de León. 2022 .....	75
Imagen 77. <i>Boquillas de 20 y 30 milímetros</i> . Esteban Pérez de León. 2022.....	78
Imagen 78. <i>Comparación entre alturas de capa</i> . Xiao et al. 2020. ....	79
Imagen 79. <i>Extrusiones experimentales</i> . Esteban Pérez de León. 2022 .....	82
Imagen 80. <i>La mezcla ideal</i> . Esteban Pérez de León. 2022.....	82

Imagen 81. <i>Molienda de arcilla</i> . Esteban Pérez de León. 2022 .....	83
Imagen 82. <i>La mezcla en seco</i> . Esteban Pérez de León. 2022 .....	83
Imagen 83. <i>Extrusión para pruebas</i> . Esteban Pérez de León. 2022.....	83
Imagen 84. <i>Pruebas de compresión</i> . Esteban Pérez de León. 2022.....	83
Imagen 85. <i>Cargando 55 Kg</i> . Esteban Pérez de León. 2022 .....	83
Imagen 86. <i>Experimentando</i> . Esteban Pérez de León. 2022.....	83
Imagen 87. <i>Analizando</i> . Esteban Pérez de León. 2022.....	92
Imagen 88. <i>Comparación entre velocidades de extrusión y desplazamiento</i> . Esteban Pérez de León. 2022 .....	95
Imagen 89. <i>Comparación entre velocidades de extrusión y desplazamiento</i> . Xiao et al. 2020. ....	95
Imagen 90. <i>Gratificante desorden</i> . Esteban Pérez de León. 2022.....	101
Imagen 91. <i>El siguiente paso</i> . Esteban Pérez de León. 2022 .....	102
Imagen 92. <i>Concept1</i> . Esteban Pérez de León. 2022 .....	106
Imagen 93. <i>Concept2</i> . Esteban Pérez de León. 2022.....	106
Imagen 94. <i>Concept3</i> . Esteban Pérez de León. 2022 .....	106
Imagen 95. <i>Concept4</i> . Esteban Pérez de León. 2022 .....	106
Imagen 96. <i>Concept5</i> . Esteban Pérez de León. 2022 .....	107
Imagen 97. <i>Concept6</i> . Esteban Pérez de León. 2022 .....	107
Imagen 98. <i>Concept7</i> . Esteban Pérez de León. 2022 .....	107

### 13.- Índice de Tablas

Tabla 1. <i>Variables 1-2</i> . Esteban Pérez de León. 2022.....	77
Tabla 2. <i>Variables 1-3</i> . Esteban Pérez de León. 2022.....	78
Tabla 3. <i>Variables 1-4</i> . Esteban Pérez de León. 2022.....	79
Tabla 4. <i>Variables 1-7</i> . Esteban Pérez de León. 2022.....	81
Tabla 5. <i>Variables</i> . Esteban Pérez de León. 2022 .....	81
Tabla 6. <i>Reporte fotográfico, muestras 1-3</i> . Esteban Pérez de León. 2022.....	86
Tabla 7. <i>Resultados experimentales, muestras 1-3</i> . Esteban Pérez de León. 2022.....	87
Tabla 8. <i>Reporte fotográfico, muestras 4-6</i> . Esteban Pérez de León. 2022.....	88
Tabla 9. <i>Resultados experimentales, muestras 4-6</i> . Esteban Pérez de León. 2022.....	89
Tabla 10. <i>Reporte fotográfico, muestras 7-9</i> . Esteban Pérez de León. 2022.....	90
Tabla 11. <i>Resultados experimentales, muestras 7-9</i> . Esteban Pérez de León. 2022.....	91
Tabla 12. <i>Datos resaltados de muestra 2</i> . Esteban Pérez de León. 2022 .....	93
Tabla 13. <i>Datos resaltados de muestra 4</i> . Esteban Pérez de León. 2022.....	93
Tabla 14. <i>Fallos en muestras 7,8 y 9</i> . Esteban Pérez de León. 2022 .....	94
Tabla 15. <i>Vel.E. duplicada</i> . Esteban Pérez de León. 2022.....	94
Tabla 16. <i>Análisis mecánico de componentes</i> . Esteban Pérez de León. 2022.....	96
Tabla 17. <i>Análisis mecánico del cuerpo de contención</i> . Esteban Pérez de León. 2022.....	97
Tabla 18. <i>Análisis mecánico del cuerpo general</i> . Esteban Pérez de León. 2022.....	97
Tabla 19. <i>Análisis mecánico de los cables de comunicación</i> . Esteban Pérez de León. 2022 .....	97
Tabla 20. <i>Análisis mecánico de la caja de electrónicos</i> . Esteban Pérez de León. 2022 .....	98
Tabla 21. <i>Análisis mecánico del eje principal</i> . Esteban Pérez de León. 2022.....	98
Tabla 22. <i>Análisis mecánico del motor de extrusión</i> . Esteban Pérez de León. 2022 .....	98

Tabla 23. <i>Análisis mecánico de las paletas de revoltura</i> . Esteban Pérez de León. 2022.....	99
Tabla 24. <i>Análisis mecánico del piñón de desplazamiento</i> . Esteban Pérez de León. 2022 .....	99
Tabla 25. <i>Análisis mecánico del piñón de extrusión</i> . Esteban Pérez de León. 2022 .....	99
Tabla 26. <i>Análisis mecánico del riel de tracción</i> . Esteban Pérez de León. 2022 .....	100
Tabla 27. <i>Análisis mecánico del tornillo de extrusión</i> . Esteban Pérez de León. 2022.....	100

### **13.- Índice de Gráficas**

Gráfica 1. <i>Relación Vel.E.-Ancho del cordón m.1-3</i> . Esteban Pérez de León. 2022.....	87
Gráfica 2. <i>Relación Vel.E.-Ancho del cordón m.4-6</i> . Esteban Pérez de León. 2022.....	89
Gráfica 3. <i>Relación Vel.E.-Ancho del cordón m.7-9</i> . Esteban Pérez de León. 2022.....	91